



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ŘÍDICÍ JEDNOTKA INDUKČNÍHO OHŘEVU

INDUCTION HEATING CONTROL UNIT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Martin Válik**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Ladislav Macháň**

**BRNO 2016**

## **ABSTRACT**

Text je zameraný na vývoj riadiacej jednotky indukčného ohrevu. Motiváciou k vytvoreniu takéhoto zariadenia bolo odstránenie nedostatkov a pridanie potrebných funkcionalít k zariadeniu tohto typu. Bolo to dosiahnuté predovšetkým zakomponovaním grafického displeja a USB rozhrania. Grafický TFT displej spolu s tlačidlami a rotačným enkodérom tvoria užívateľské rozhranie. Súčasťou riadiacej jednotky je navyše obvod vyhodnocujúci teplotu z troch termočlánkov. V práci je riešené optimálne riešenie napájania, komunikácie riadiacej jednotky s výkonnou časťou, spôsob riadenia grafického TFT displeja a výber ostatných komponentov. Jadrom je samozrejme vhodný mikrokontrolér, ktorý riadi všetky ostatné časti zariadenia.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Mikrokontrolér, analógovo-digitálny prevodník, TFT displej, rozhranie USB

## **ABSTRACT**

The text is focused on development induction heating coltroller. The motivation to create such a device was to correct deficiencies and add the necessary functionality for a device of this type. This was achieved mainly by adding the graphic display and USB interface. Graphic TFT display with buttons and a rotary encoder creates user interface. Part of the control unit is also circuit evaluateing temperature from three thermocouples. The paper dealt with the optimal solution for power supply, communication between control unit and power part, way of controlling graphical TFT display and selection of other components. The core is of course, suitable microcontroller, which manage all parts of the device.

## **KEY WORDS**

Microcontroller, analog to digital converter, TFT display, USB interface,

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma řídicí jednotka indučního ořevu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavovi Macháňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.



Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# Obsah

Úvod .....	7
1   Bloková schéma .....	8
1.1   Popis blokovej schémy .....	9
2   Mikrokontrolér .....	11
2.1   Delenie jadier ARM.....	11
2.2   Delenie rady Cortex M .....	11
2.3   Výber vhodného mikrokontroléru .....	13
2.4   Mikrokontrolér STM32F429IG .....	13
3   Správa napájania .....	17
3.1   Lineárny regulátor .....	17
3.2   Znižujúci DC/DC menič .....	18
3.3   Výber vhodného meniča .....	19
4   Výber Komponentov .....	20
4.1   Analógovo-digitálny prevodník.....	20
4.2   Externé pamäte .....	20
4.3   Podporné obvody USB rozhrania .....	21
4.4   TFT displej .....	21
4.5   Modul WIFI.....	21
5   Popis použitých rozhraní.....	23
5.1   Rozhranie SPI.....	23
5.2   Rozhranie UART .....	24
5.3   Rozhranie CAN .....	25
5.4   Rozhranie RGB.....	26
5.5   Rozhranie USB .....	27
6   Softvérové komponenty .....	30
6.1   Operačný systém reálneho času.....	30
6.2   Grafická knižnica.....	32
6.3   FAT systém.....	34
7   Praktická realizácia .....	37
7.1   Návrh schémy zapojenia.....	37

7.2	Návrh dosky plošného spoja.....	39
7.3	Softvérová realizácia .....	41
7.4	Praktická ukážka.....	43
	Záver.....	45
	Zoznam obrázkov .....	46
	Zoznam tabuliek .....	47
	Zoznam použitých skratiek .....	48
	Zoznam použitých zdrojov .....	49
	Prílohy .....	51

# Úvod

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť prototyp riadiacej jednotky určenej k riadeniu indukčného ohrevu. Pod pojmom riadiaca jednotka je myslené zariadenie, ktoré je schopné riadiť ohrev podľa vopred nastavenom teplotnom profile, zobrazovať aktuálny stav ohrevu a automaticky ukladať zobrazený profil do internej pamäte jednotky. Motiváciou k vytvoreniu spomínaného zariadenia je v prvom rade malá dostupnosť takých zariadení na trhu a taktiež ich nepraktickosť alebo absencia dôležitých funkcií. Nepraktickosť spočíva v neintuitívnej obsluhu zariadenia. Sledovanie priebehu teploty a následné uloženie na pamäťové médium je v priemysle taktiež veľmi žiadúce. Práca vznikla na základe požiadavky o vývoj takéhoto zariadenia firmou DAWELL.

Dominantným prvkom zariadenia je grafický displej, ktorého úlohou je tvoriť užívateľské rozhranie. Jeho riadenie je riešené za využitia mikrokontroléru STM32F429 s architektúrou ARM Cortex M4, ktorý je jadrom celého systému zabezpečujúci riadenie všetkých prvkov využitých v systéme. Aktuálna teplota je vyhodnocovaná prostredníctvom termočlánkov a následne zobrazovaná na TFT displeji. Zobrazovaný priebeh je v prípade potreby automaticky uložený do vnútornej pamäte jednotky, odkiaľ je možné dáta prekopírovať na pamäťové médium pripojené cez rozhrania USB. Prepojenie riadiacej jednotky a výkonovej časti indukčného ohrevu je realizované pomocou komunikačnej zbernice CAN. Užívateľské rozhranie je založené na niekoľkých obrazovkách s popisom ovládania, ktoré užívateľa vedie celým procesom konfigurácie a spustenia ohrevu.

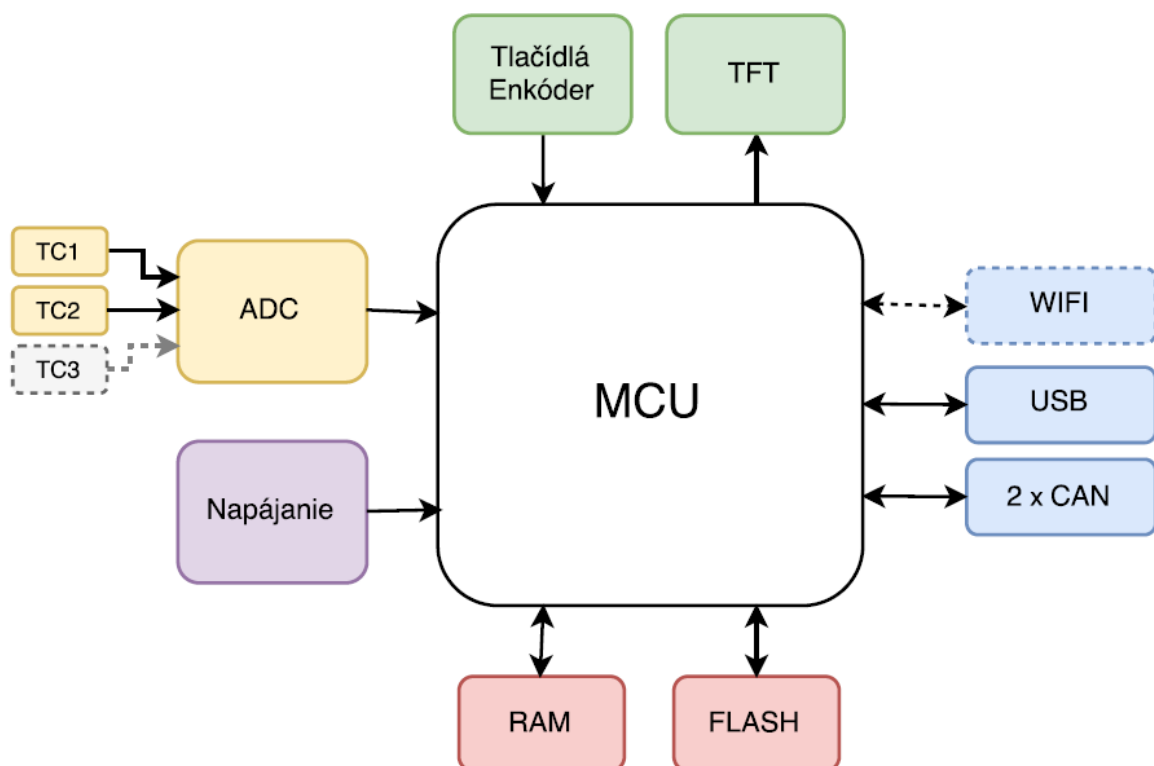
Text diplomovej práce je členený do niekoľkých kapitol, logicky usporiadaných podľa postupu návrhu. V prvej kapitole je možné nájsť principiálnu schému riadiacej jednotky a jej stručný popis. V druhej kapitole sa pojednávajú rôzne architektúry mikrokontrolérov a výber najvhodnejšieho mikrokontroléru pre zameranie našej aplikácie. Obsahom ďalšej kapitoly je správa napájania, kde sú porovnávané dva základné druhy znižujúcich meničov a opäť sa kladie dôraz na výber správneho pre našu aplikáciu. Vo štvrtej kapitole sú uvedené dôvody, ktoré viedli k výberu ostatných komponentov. Predmetom piatej kapitoly je stručný popis rozhraní použitých na komunikáciu mikrokontroléra s ostatnými prvkami v systéme. Šiesta kapitola je zameraná na popis dôležitých softvérových komponentov, ktoré boli použité pri vývoji. Posledná siedma kapitola sa zaoberá praktickou realizáciou a teda návrhom schémy, dosky plošného spoja, softvérovou realizáciou a na záver praktickou ukážkou.

# 1 Bloková schéma

Na nasledujúcom obrázku je znázornená bloková schéma zariadenia. Jednotlivé bloky sú farebne logicky odlišené podľa úlohy ktorú zastupujú v systéme. Tento systém pozostáva z desiatich hlavných blokov:

**Tab. 1** Popis blokovej schémy

MCU	Mikrokontrolér riadi všetky ostatné časti systému
Napájanie	Správa napájania, prispôsobuje/vytvára napätie, potrebné pre všetky časti systému
ADC	Analógovo–digitálne prevodníky
Tlačidlá a enkodér	Tlačidlá a enkodér sú určené na ovládanie zariadenia
TFT	Zobrazovacia jednotka, grafický TFT displej
WIFI	WIFI modul určený pre komunikáciu s ostatnými zariadeniami
USB	Slúži k pripojeniu zariadenia k PC, alebo k pripojeniu USB kľúču
CAN	CAN rozhrania pre komunikáciu s okolím
FLASH	FLASH pamäť na ukladanie dát
RAM	RAM pamäť na dočasné ukladanie grafického obsahu zobrazovaného na grafickom TFT displeji, prípadne iné dáta



**Obr. 1** Bloková schéma riadiacej jednotky



## 1.1 Popis blokovej schémy

Jadrom celej riadiacej jednotky je 32-bitový mikrokontrolér STM32F429 s architektúrou ARM Cortex M4, ktorý komunikuje s ostatnými perifériami.

Zariadenie obsahuje niekoľko blokov na meranie teploty (dva alebo tri podľa verzie zariadenia), získavaná použitím termočlánkov. Výstupné napätie z termočlánku je zdigitalizované analógovo-digitálnym prevodníkom a získané dáta následne posielané do mikrokontroléra prostredníctvom SPI zbernice.

TFT displej spolu s tlačidlami a enkodérom tvoria užívateľské rozhranie na obsluhu riadiacej jednotky. Mikrokontrolér je pripojený k displeju štandardným RGB rozhraním. TFT displej plní úlohu zobrazovania vopred nadefinovaných pracovných plôch na nastavovanie výkonu ohrevu, monitorovanie teploty termočlánkov a prípadne iné pridané funkcionality. Užívateľ je schopný meniť rôzne parametre ohrevu, záznamu teploty, monitorovania teploty a ďalších funkcií, pomocou tlačidiel a enkodéru.

Riadiaca jednotka indukčného ohrevu obsahuje USB rozhranie ktoré v budúcnosti umožňuje jednoduché prepojenie riadiacej jednotky s PC a inými zariadeniami. Riadiaca jednotka je schopná pracovať v dvoch režimoch podľa pripojeného zariadenia (PC alebo USB kľúč). V prvom prípade počas komunikácie s PC sa riadiaca jednotka chová ako zariadenie typu device (slave). V druhom prípade po pripojení USB kľúču ako host (master). Mikrokontrolér obsahuje perifériu USB OTG, ktorú je možné nakonfigurovať v oboch spomínaných režimoch (device a host). Po pripojení USB kľúču je možné prekopírovať záznam teploty z externej FLASH pamäte na USB kľúč alebo aktualizovať softvér v prípade výskytu súboru s novým firmvérom na USB kľúči. Po pripojení riadiacej jednotky k PC bude možné meniť parametre ohrevu použitím špeciálneho softvéru určeného na komunikáciu s riadiacou jednotkou.

V riadiacej jednotke sú použité dve CAN rozhrania, ako je znázornené na blokovej schéme. Prvé určené pre internú komunikáciu v rámci zariadenia a druhé na komunikáciu medzi niekoľkými zariadeniami. Bezdrôtové prepojenie (nie je obsahom tejto práce) zariadení bude možné pomocou WIFI modulu. Táto alternatíva bude voliteľná, podľa verzie zariadenia. WIFI modul je prepojený s mikrokontrolérom sériovou linkou (UART).

K mikrokontroléru sú pripojené dve externé pamäte a to RAM a NAND FLASH. RAM pamäť je nutná k vytvoreniu grafického obsahu ktorý je následne zobrazovaný na TFT displeji, prípadne k ukladaniu iných dát. NAND FLASH Slúži k uloženiu ikon, grafiky a záznamu teploty. Mikrokontrolér komunikuje s pamäťami prostredníctvom štandardného paralelného rozhrania, ktoré je rovnaké pre väčšinu externých pamätí.

Ďalším podstatným blokom je správa napájania. Tá slúži na úpravu napájacieho napätia pre jednotlivé komponenty riadiacej jednotky. Potrebné napájacie napätia sú 3,3V, 5V a 26V. K riadiacej jednotke je pripojený zdroj 5V a z toho dôvodu je nutné znižujúcim meničom

odvodiť napätie 3,3V pre Mikrokontrolér, WIFI modul a externé pamäte. Podsvietenie TFT displeja vyžaduje 26V a je teda nutné použiť zvyšujúci menič. Všetky ostatné komponenty pracujú s napájaním napätím 5V.

Funkcia jednotlivých blokov a ich spôsob komunikácie s mikrokontrolérom je detailnejšie popísaná v nasledujúcich kapitolách.

## 2 Mikrokontrolér

Kľúčovú rolu v návrhu riadiacej jednotky indukčného ohrevu bol výber vhodného mikrokontroléru. Na trhu sa v dnešnej dobe vyskytuje nespočetné množstvo mikrokontrolérov od rôznych výrobcov a vybrať ten správny pre danú aplikáciu nemusí byť vždy jednoduché. Prvou otázkou je výber správnej architektúry. Vo väčšine priemyselných aplikácií momentálne dominujú procesory alebo mikrokontroléry s jadrom od spoločnosti ARM.

### 2.1 Delenie jadier ARM

Obvody s jadrom ARM majú niekoľko podmnožín:

- Cortex A,
- Cortex R,
- Cortex M.

Prvá je určená pre procesory, ktoré sú taktované vyšším kmitočtom ako bežné mikrokontroléry a sú charakteristické prítomnosťou špeciálnych periférií ako napr. MMU (Memory Management Unit), ktorá je nutná pre chod operačných systémov (Linux, Android, Windows atď.). Z popisu je zrejmé, že táto architektúra sa využíva predovšetkým v zariadeniach ako napr. mobilné telefóny.

Druhá spomínaná architektúra Cortex R je určená prevažne do tzv. “Real Time“ aplikácií, kde je kritická rýchla odozva na rôzne udalosti, hlavne prerušenia. Tieto mikrokontroléry sa vyznačujú najmenšou latenciou doby skoku do prerušenia po detekcii danej udalosti.

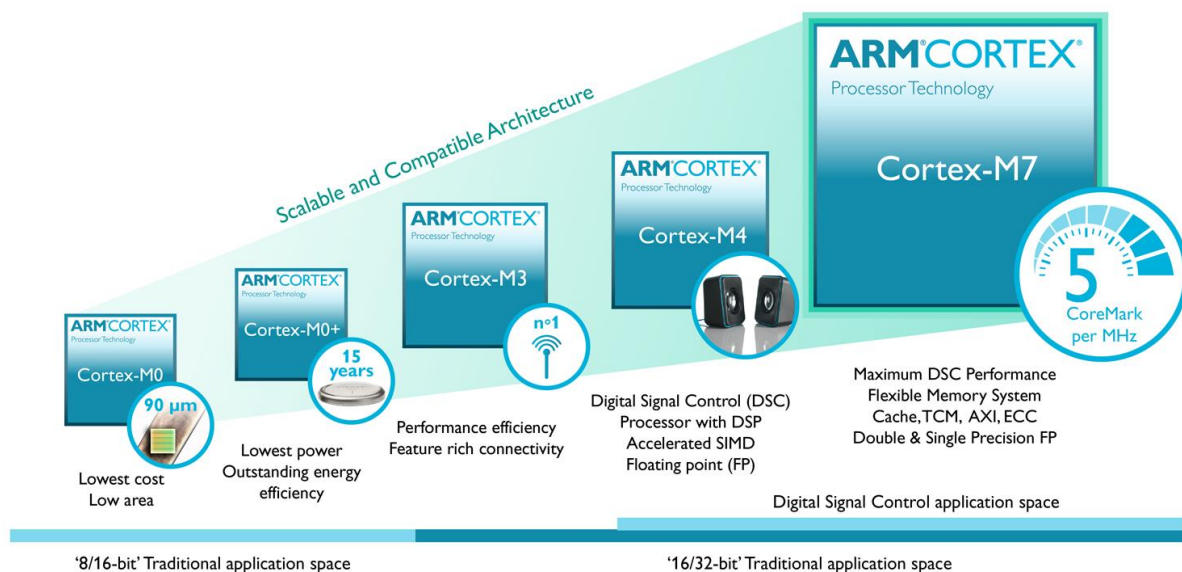
Poslednou Architektúrou je Cortex M, určená ako už názov napovedá, pre embedded aplikácie. Jedná sa o 32-bitovú architektúra, ktorá tvorí majoritné zastúpenie v priemyselných a jednoúčelových zariadeniach. Obvody s touto architektúrou poskytuje takmer každý výrobca mikrokontrolérov a sú navyše cenovo veľmi výhodné aj v porovnaní s 8/16-bitovými.

### 2.2 Delenie rady Cortex M

Cortex M je spoločný názov pre nasledujúce jadrá:

- Cortex M0,
- Cortex M0+,
- Cortex M3,
- Cortex M4,
- Cortex M7.

Na Obr. 2 je znázornený prehľad jadier rodiny Cortex M, s ich stručnou charakteristikou.



**Obr. 2 Porovnanie jadriar Cortex M [1]**

Mikrokontrolér s jadrom Cortex M0 je (32-bitová architektúra, podobne ako všetky jadrá typu Cortex M) vhodný pre jednoduché aplikácie, kde by bol v minulosti použitý 8-bitový mikrokontrolér. Jadro Cortex M0 v porovnaní s 8/16-bitovým poskytuje väčší výpočetný výkon. Ďalšou výhodou je spätná inštrukčná kompatibilita s inými jadrami Cortex M, takže program napísaný pred toto jadro môže byť bez problémov spustený na vyšších radách Cortex M. V neposlednom rade sú mikrokontroléry s týmto jadrom veľmi cenovo výhodné. Cortex M0+ je mierne modifikovaná architektúra určená pre nízko-príkonové aplikácie.

Cortex M3 predstavuje bežné 32-bitové jadro, ktoré vďaka bohatšej inštrukčnej sade, poskytuje väčší výkon v porovnaní s jadrom Cortex M0. Mikrokontroléry s týmto jadrom našli uplatnenie v rôznych aplikáciách počínajúc jednoduchými hračkami, až po industriálne zariadenia a automobilový priemysel.

Jadro Cortex M4 poskytuje opäť vyšší výkon a novú sadu inštrukcií. Patria sem predovšetkým inštrukcie na rýchle spracovanie signálu (DSP). To umožňuje do mikrokontroléru implementovať matematické funkcie, ktoré boli v minulosti riešené len pomocou signálového procesoru alebo FPGA. Cortex M4 obsahuje taktiež FPU (Floating Point Unit), koprocessor na výpočty s číslami v desatinnej forme. Týmto spôsobom sme schopný dosiahnuť presnejší výsledok, ako pri počítaní s celými číslami. Medzi typické aplikácie spomínaných rýchlych výpočtov patria napr. spracovanie audio signálu v reálnom čase, filtrácia signálu, regulátory atď.

Cortex M7 je najvýkonnejšie jadro z rodiny Cortex M. Toto jadro prináša funkcionality, ktoré v minulosti neboli súčasťou mikrokontrolérov a to predovšetkým super-skalárny pipeline a Cache pamäte. Dá sa teda vnímať ako medzistupeň medzi mikrokontrolérom a procesorom. Uplatnenie nájdeme v pokročilých aplikáciách spracovania signálu, kontrola motorov...

Detailnejší popis nájdete v dokumentáciách internetových stránkach ARM [1].

## 2.3 Výber vhodného mikrokontroléru

Z blokovej schémy a jej popisu sú zrejmé periférie, aké musí mikrokontrolér obsahovať, aby bol vhodný pre našu aplikáciu. Väčšina pokročilejších mikrokontrolérov obsahuje bežne používané periférie UART, SPI, I2C, CAN, USB a rozhranie na komunikáciu s externými pamäťovými kartami. V našej aplikácii musíme byť schopný navyše riadiť grafický TFT displej.

Do úvahy prichádzajú nasledujúce možnosti:

- displej s integrovaným radičom,
- externý grafický akcelerátor,
- mikrokontrolér s integrovaným grafickým akcelerátorom.

Displej s integrovaným radičom je vhodné riešenie pre aplikácie s malým rozmerom displeja. Na internete je možné nájsť veľké množstvo knižníc, ktoré uľahčujú prácu s displejom a sú vhodné aj pre 8/16-bitové mikrokontroléry. Nevýhodou je relatívne malá prenosová rýchlosť a je to teda nepoužiteľné v aplikáciách vyžadujúci väčší rozmer displeja.

Ďalšou variantou je externý grafický akcelerátor pripojený k mikrokontroléru z pravidla jedným zo sériových rozhraní SPI, I2C, UART, USB. Výhodou je možnosť použitia mikrokontroléru s menším výkonom, pretože nebude zaťažovaný vykresľovaním displeja. Predstaviteľom takéhoto grafického akcelerátora sú napr. obvody rady FT80x od firmy FTDI. Tieto obvody integrujú logiku na riadenie displeja (s RGB rozhraním), snímanie dotyku prstu na dotykovom paneli a generovanie audio signálu. Obsahuje navyše integrovanú pamäť RAM, takže nie je nutné používať externú pamäť. Nevýhoda oproti poslednej variante je menšia flexibilita, pretože funkcie grafického akcelerátora nie je možné rozšíriť.

Poslednou zo spomínaných možností je riadenie displeja pomocou mikrokontroléra s integrovaným grafickým akcelerátorom (RGB rozhranie). Táto varianta poskytuje najväčšiu flexibilitu a vďaka hardvérovej podpore RGB rozhrania nezaťažuje mikrokontrolér samotným vykresľovaním. Grafický obsah aktuálne zobrazovanej plochy na displeji je vytvorený v externej RAM pamäti a následne sa automaticky kopíruje na displej použitím špeciálneho DMA2D. Podrobnejší postup vykresľovania bude priblížený v jednej z nasledujúcich kapitol.

## 2.4 Mikrokontrolér STM32F429IG

Na základe požiadaviek zhrnutých v predchádzajúcej podkapitole, bol zvolený vhodný obvod z rodiny mikrokontrolérov STM32F429 od firmy ST Microelectronics. Mikrokontrolér má integrované už spomínané jadro Cortex M4, poskytujúce dostatočný výkon pre našu aplikáciu. DSP (Digital Signal Processing) inštrukcie budú použité na filtráciu dát prijatých z externého analógovo-digitálneho prevodníku a FPU na presné výpočty.

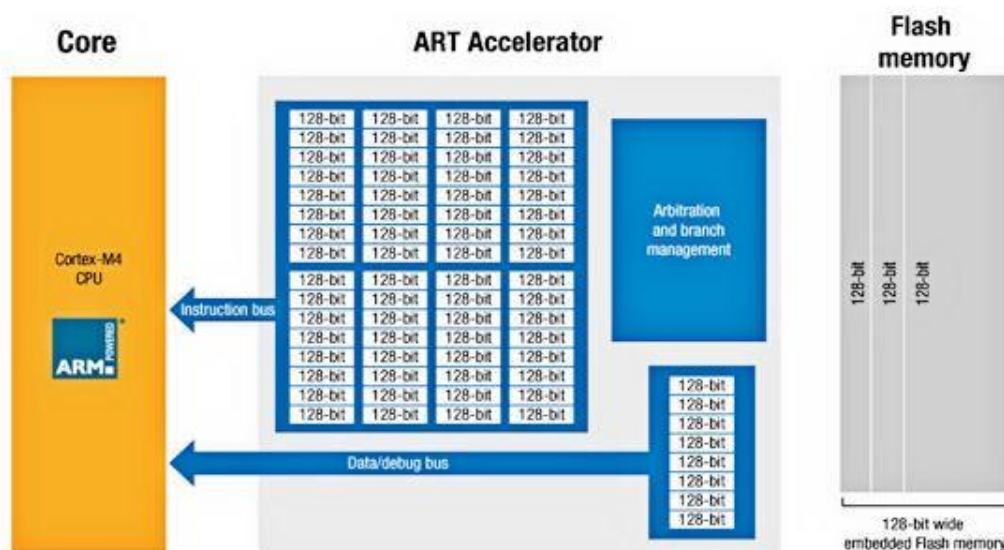
Medzi základné vlastnosti mikrokontroléru patrí:

**Tab. 2** *Vybrané parametre mikrokontroléru*

Taktovacia frekvencia	180 MHz
Napájacie napätie	1.7–3.6 V
Pamäte	1 MB FLASH, 256 KB RAM, 64 KB CCM
Akcelerácia int. pamäti	ART akcelerátor
Radič ext. pamätí	SRAM, SDRAM, NAND/NOR/Compact FLASH
Grafická akcelerácia	LCD/TFT radič, Chrom ATR akcelerátor (DMA2D)
Sériové rozhrania	SPI, UART, I2C, I2S, CAN, USB OTG
Analógové rozhrania	3 x 12-bit ADC, 2 x 12-bit DAC

V nasledujúcich riadkoch sú priblížené určité funkcie tohoto mikrokontroléru, ktorými sa odlišuje od ostatných.

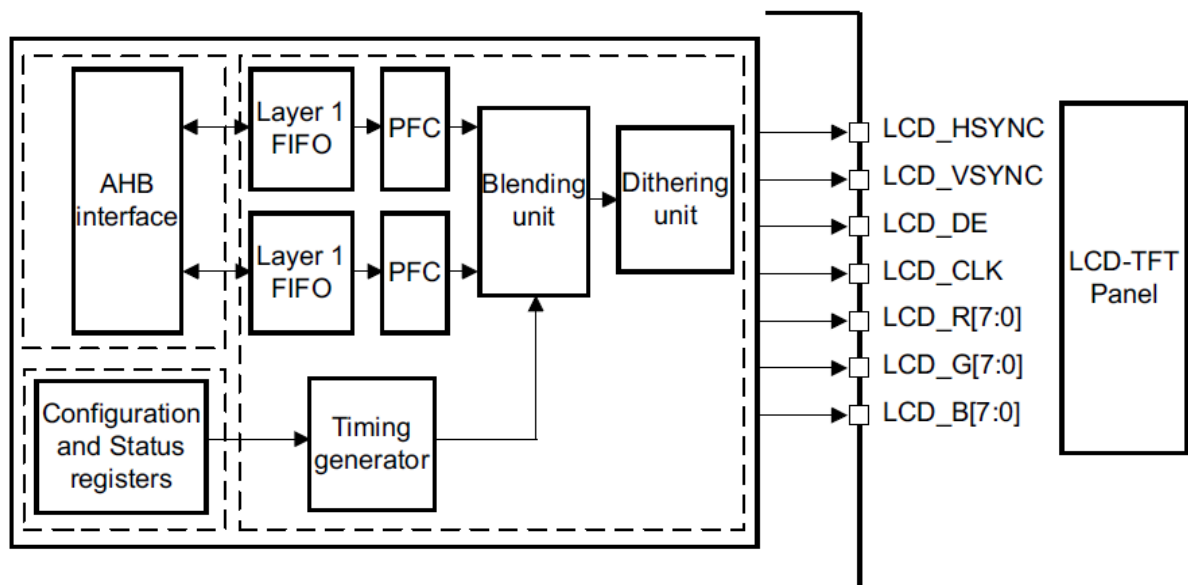
Jadro Cortex M4 je založené na RISC architektúre, čo znamená, že prevažná väčšina inštrukcií je vykonaná počas jedného hodinového cyklu. To by v ideálnom prípade predstavovalo pri taktovacej frekvencii 180 MHz, viac ako 180 miliónov (1.25 DMPS/MHz) operácií za sekundu. To je ale len teoretická hodnota, nie reálna, kvôli latencii internej FLASH pamäte odkiaľ je z pravidla program vykonávaný. Interná FLASH pamäť je taktovaná frekvenciou 30 MHz, to by znamenalo, že bez ohľadu na taktovacu frekvenciu jadra, inštrukcie by neboli nevykonávali rýchlejšie, ako na taktovacej frekvencii pamäte. Z toho dôvodu v sebe mikrokontroléry rady Cortex M integrujú 128-bitovú vyrovnávaciu pamäť do ktorej je uložených niekoľko nasledujúcich inštrukcií. Jadro Cortex M4 obsahuje inštrukcie s bitovou šírkou 16 a 32 bitov, takže vo vyrovnávacej pamäti sa nachádza od 4 do 8 inštrukcií. To ale stále nie je dostačujúce, pretože latencia by nevznikala len v prípade, že vykonávaný program by mal čisto sekvenčný charakter bez akýchkoľvek skokov, po ktorých je z pravidla nutné načítať do vyrovnávacej pamäte nový obsah z FLASH pamäte. Mikrokontroléry rady STM32F4 integrujú akcelerátor internej FLASH pamäte, zobrazený na nasledujúcom obrázku.



*Obr. 3 ART akcelerátor [2]*

Ten je možné si ho predstaviť ako vyrovnanú pamäť 64 x 128-bitov. Pri načítaní určitej časti programu sa 128-bitov (4 až 8 inštrukcií) uloží do jednej zo 64 buniek akcelerátora. To teda znamená, že nie je nutné zakaždým načítať dáta z FLASH pamäte pri malých skokoch, pretože daná časť programu je už uložená v jednej zo 64 buniek akcelerátora.

Ďalšou charakteristickou vlastnosťou je radič LCD/TFT displejov, ktoré poskytuje hardvérové generovanie signálov 24-bitového RGB rozhrania na riadenie displeja. Radič podporuje rozlíšenie displeja maximálne XGA (1024 x 768) a zobrazovanie dvoch hladín zároveň, pričom pre každú hladinu je možné nastaviť parametre osobitne. Aby bol schopný LCD/TFT radič neustále vykresľovať požadovanú plochu na displej, musí stále dostávať aktuálne dáta. Túto funkciu sprostredkúva tzv. DMA2D (Chrom ART akcelerátor). Je to špeciálne DMA určené na kopírovanie obrázkov resp. grafického obsahu. Po nastavení parametrov obrázku resp. celej pracovnej plochy, ako je šírka, výška, grafický formát a ďalších, je možné spustiť kopírovanie dát z pamäti do LCD/TFT radiča. Týmto spôsobom je docielené minimálne zaťaženie jadra súvisiace s vykresľovaním displeja. Detailnejšie sa tejto problematike budeme venovať v niektorej z nasledujúcich kapitol súvisiacich so samotnou softvérovou implementáciou.



**Obr. 4** Bloková schéma LCD/TFT radiča [3]

Na obr. 4 je znázornená bloková schéma radiča. DMA2D, ktorý sprostredkúva dáta z pamäte pomocou AHB zbernice. Dáta sú predávané vyrovnávacej FIFO pamäti pre každú hladinu samostatne. Nasledujúci blok PFC (Pixel Format Converter) prevádza podľa potreby formát zobrazovaného obsahu napr. z RGB888 na RGB444. Blok “Blending unit” slúži na zmiešanie výstupu z oboch hladín a vytvára tak finálny obraz zobrazovaný na displej. Dithering unit je možné aktivovať v prípade, že na displeji vznikajú nežiadúce grafické efekty, vznikajúce napr. pri zobrazovaní obsahu s 24-bitovou hĺbkou farby na displeji s podporou len 18-bitovej hĺbke.



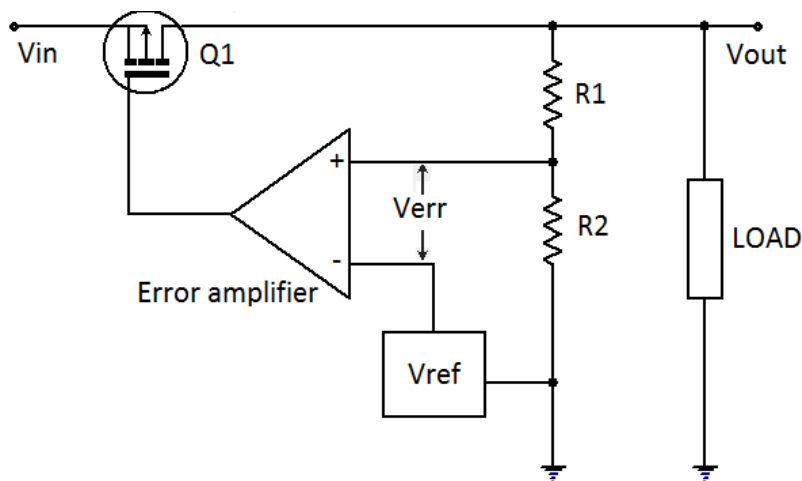
## 3 Správa napájania

Riadiaca jednotka indukčného ohrevu obsahuje komponenty vyžadujúce rôzne napájanie napätie. Do riadiacej jednotky vstupuje napätie 5V, z ktorého musia byť následne odvodené požadované napäťové úrovne. Zbernice USB a CAN pracujú s napätím 5V, ale všetky ostatné obvody vyžadujú 3,3V až na jednu výnimku čím je podsvietenie TFT displeja.

Na zníženie napätia prichádzal do úvahy lineárny regulátor alebo znižujúci DC/DC menič. Pre niektoré aplikácie je vhodnejší lineárny regulátor, pre iné naopak DC/DC menič. V nasledujúcich dvoch podkapitolách bude stručne zhrnutý princíp ich funkcie, výhody a nevýhody.

### 3.1 Lineárny regulátor

Na obr.5 je znázornená typické vnútorné zapojenie lineárneho regulátora. Medzi základné komponenty regulátora patrí operačný zosilňovač, interná referencia, a výstupný tranzistor. Princíp funkcie je veľmi jednoduchý. Výstup z odporového deliča tvoreného rezistormi R1 a R2 je pripojený na neinvertujúci vstup operačného zosilňovača a je porovnávaný s napätím internej referencie pripojeným na invertujúci vstup. Rozdiel týchto napätí ( $V_{err}$ ) je vynásobený zosilnením operačného zosilňovača a prenesený na výstup, ktorý budí hradlo z tranzistoru. Vďaka spätnej väzbe tvorenej odporovým deličom, operačným zosilňovačom, a vnútornou referenciou, lineárny regulátor udržiava stabilné výstupné napätie na výstupe  $V_{out}$ .



**Obr. 5** Principiálne zapojenie lineárneho regulátora [5]

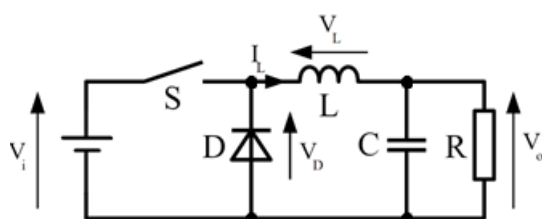
Z uvedeného popisu vyplýva, že zmenou pomeru rezistorov R1 a R2 je možné regulovať výstupné napätie. To je dôvod prečo, niektoré lineárne stabilizátory nemajú rezistory integrované ale je nutný ich externe pripojiť a tým nastaviť požadované výstupné napätie.

Nevýhodou lineárneho regulátora je nízka účinnosť, keďže stratový výkon spôsobený napätím na regulátore a prúdom ním tečúcim sa mení na teplo a teda je nutné chladenie (pri väčších

výkonoch). Nevýhodou môže byť aj tzv. “dropout voltage“ čo má za následok menšie výstupné napätie oproti vstupnému. Výhodou je jednoduchá realizácia, nízka cena, malé rozmery (platí pre malé výkony) a nezanáša rušenie do obvodu.

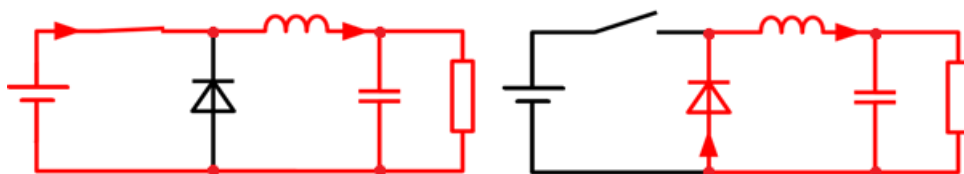
### 3.2 Znižujúci DC/DC menič

V dnešnej dobe sa na trhu vyskytuje veľké množstvo znižujúcich DC/DC meničov. Zjednodušená forma najbežnejšej topológie je znázornená na Obr. 6 *Elementárne zapojenie znižujúceho meniča* [6]. Jedná sa o tzv. “Buck converter“. Princíp funkcie je relatívne jednoduchý. Zapojenie sa skladá z elementárnych elektronických prvkov.



Obr. 6 Elementárne zapojenie znižujúceho meniča [6]

Pred zopnutím spínača obvodom netečie žiaden prúd. Po zopnutí spínača začne prúd tečť cez induktor, kondenzátor a záťaž, ako je to naznačené na (vľavo). V tejto fáze induktor ukladá energiu vo forme magnetického poľa a kapacitor je nabíjaný prúdom. V druhej fáze, po odpojení prepínača začne pretekať prúd diódou. Induktor a kapacitor využívajú energiu nazhromaždenú v predchádzajúcej fáze a tak podporujú prúd tečúci obvodom.



Obr. 7 Princíp funkcie znižujúceho meniča [6]

V reálnom DC/DC meniči je spínač nahradený tranzistorom, buďený PWM signálom. Výstupné napätie odpovedá striede PWM signálu

$$U_o = U_i \times \frac{t_{on}}{T} [V] \quad (1)$$

Kde  $U_o$  reprezentuje výstupné napätie,  $U_i$  predstavuje vstupné napätie,  $t_{on}$  dobu zopnutého spínača a  $T$  periódu. Tento vzorec sa ale vzťahuje len na obvod s ideálnymi (bezstratovými) komponentami.

Nevýhodou DC/DC meniča v porovnaní s lineárnym regulátorom je väčší počet externých komponentov, zložitejších návrh dosky plošných spojov a zavádzanie rušenia do obvodu.

Výhodou je vysoká účinnosť, pretože energia sa ukladá v cievke vo forme magnetického poľa a nemení sa na teplo ako je tomu u lineárneho stabilizátoru.

### 3.3 Výber vhodného meniča

Pri výbere vhodného obvodu na úpravu (zníženie) napájacieho napätia bolo nutné brať do úvahy hlavne pomer výstupného a vstupného napätia, priemerný výstupný prúd, maximálny výstupný prúd a rozmery.

Rozdiel vstupného a požadovaného výstupného napätia síce nie je kritický, ale musíme brať do úvahy aj odber prúdu. V nasledujúcej tabuľke sú uvedené orientačne hodnoty maximálnej spotreby jednotlivých komponentov riadiacej jednotky.

**Tab. 3** Spotreba komponentov

Komponenty	Spotreba [mA]
Mikrokontrolér	100
WIFI	220
Podsvietenie displeja	250
Externá pamäť FLASH	30
Externá pamäť RAM	110
2 x CAN	50
USB	100
ADC	Zanedbateľné
TFT displej (bez podsvietenia)	Zanedbateľné
<b>Súčet</b>	<b>860</b>

Z tabuľky je zrejmé, že prúdový odber komponentov je značný a v prípade lineárneho regulátoru by dochádzalo k veľkým stratám, čo by viedlo k veľkej chladiacej ploche na doske plošného spoja. Z toho dôvodu bol napriek zložitejšiemu návrhu a vyššej cene zvolený znižujúci DC/DC menič TPS62160. Zapojenie je možné nájsť v prílohe 1.

Podsvietenie TFT displeja vyžaduje napájacie napätie približne 26V, takže bolo nutné vybrať vhodný zvyšujúci DC/DC menič. Na základe pomeru vstupného a výstupného napätia, výstupného prúdu meniča a ceny bol zvolený obvod TPS61169. Menič má navyše funkciu plynulej zmeny výstupného prúdu podľa striedy PWM signálu privedeného na vstup meniča. To umožňuje zmenu jasú podsvietenia TFT displeja.

## 4 Výber Komponentov

V tejto kapitole budú diskutované dôvody, ktoré nás viedli k výberu kľúčových komponentov. Výber mikrokontroléru a obvodov na úpravu napätia tu nie sú začlenené, pretože sa o nich pojednáva v predchádzajúcich kapitolách.

### 4.1 Analógovo-digitálny prevodník

Na meranie teploty sú použité termočlánky, ktorých výstupné napätie musí byť zdigitalizované kvôli následnému spracovaniu. Aby sme boli schopný dostatočne presne vyhodnotiť teplotu, tak výber vhodného analógovo-digitálneho prevodníku bol kľúčový. Požiadavka je kladená predovšetkým na presnosť prevodníku, teda počet efektívnych bitov, malú teplotnú závislosť (drift), a prítomnosť diferenčného vstupu.

Na základe týchto parametrov bol zvolený AD prevodník ADS1220. Je to analógovo-digitálny 24-bitový  $\Delta\Sigma$  prevodník. Výrobca deklaruje počet efektívnych bitov 20, čo je dostačujúce pre našu aplikáciu. Presnosť prevodu nezávisí len od presnosti samotného prevodníku, ale aj od iných aspektov ktoré na presnosť vplývajú, ako sú napr. úroveň rušenia z okolia, návrh dosky plošných spojov atď. Z dôvodu zvýšenia presnosti, je možné výstup z AD prevodníku spracovať (filtrovať) mikrokontrolérom. Výstupná hodnota AD prevodníku je posielaná do mikrokontroléra cez SPI zbernicu. Medzi prevodníkom a mikrokontrolérom je zaradený obvod plniaci funkciu galvanického oddelenia. Schému zapojenia je priložená v prílohe 1.

### 4.2 Externé pamäte

Na ukladanie grafiky a záznamu teploty je nutné pripojiť k mikrokontroléru externé pamäte. V pamäti RAM je uložený aktuálne zobrazovaný obsah na displeji. Potrebná kapacita pamäte je možné vypočítať podľa jednoduchého vzťahu:

$$C_{min} = Res \times Bits \quad (2)$$

$$C_{min} = 272 \times 480 \times 16 = 261\,120\,B$$

Displej použitý v riadiacej jednotke bude mať rozlíšenie uvedené vo výpočte a grafický obsah bude vo formáte RGB565 z čoho vyplýva počet bitov na jeden pixel. Minimálna kapacita RAM pamäte je teda približne 260 kB. Aby ale na displeji nevznikali nežiadúce efekty spôsobené zmenou grafického obsahu (pri zmene obrazovky), je vhodné použiť dva grafické obsahy. Jeden na vykresľovanie aktuálneho obsahu a druhý na prípravu ďalšieho. Z toho vyplýva celková potrebná kapacita RAM pamäte, približne 530 kB. Ako už bolo naznačené, grafika bude uložená vo formáte RGB565, tak 16 bitov na pixel. Z toho dôvodu bude použitá paralelná RAM pamäť IS42S16160G s dostatočnou kapacitou (32 MB) a šírkou dátovej zbernice práve 16 bitov.

V externej FLASH pamäti sú uložené preddefinované obrázky, ikony a podobne. Okrem grafiky je tam uložený záznam meranej teploty. Vyčísliť potrebnú kapacitu nie je jednoduché, vzhľadom na to, že zatiaľ nie je stanovený formát a dĺžka zaznamenávaných dát. Preto bola zvolená pamäť S34ML02G2 s kapacitou 256 MB, ktorá bude určite dostatočná. Táto pamäť je podobne ako RAM pamäť pripojená k mikroprocesoru cez 16-bitovú paralelnú zbernicu.

### **4.3 Podporné obvody USB rozhrania**

Medzi USB rozhranie mikrokontroléru a konektor je nutné doplniť podporné obvody. Mikrokontrolér obsahuje USB OTG a to znamená že môže byť nakonfigurovaný ako hostiteľ alebo zariadenie. V prípade, že je v režime hostiteľa, tak musí byť schopný napájať zariadenie pripojené na USB zbernicu. To nás viedlo k výberu elektronického spínača, ktorý privedie 5V na signál  $V_{BUS}$  USB konektoru. Zvolený obvod má označenie STMP214STR, zapojenie je znázornené v prílohe 1.

Aby nedošlo k poškodeniu vstupov mikrokontroléra pri elektrostatickom výboji, obvod musí byť doplnený o ESD ochranu. Zvolený cenovo výhodný obvod IP4220CZ6 chráni dátové signály USB\_DM, USB\_DP a napájací signál  $V_{BUS}$ .

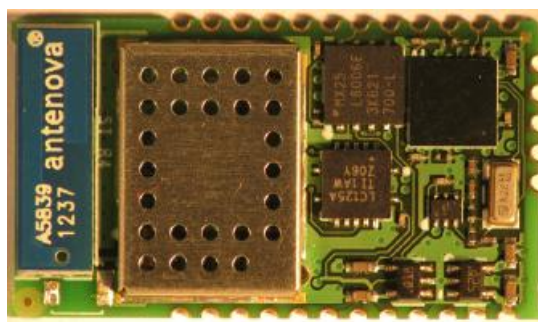
### **4.4 TFT displej**

Nevýhoda grafických displejov v porovnaní napr. so sedem segmentovým displejom je slabá viditeľnosť pri práci na slnku. Tento problém je riešiteľný niekoľkými spôsobmi. Jeden z nich je použitie krycieho skla so špeciálnou antireflexnou vrstvou, ale táto varianta je pomerne nákladná. Druhým riešením je displej s vysokou svietivosťou. Touto cestou sme sa uberali pri výbere vhodného displeja. Ďalším dôležitým parametrom je možnosť pripojiť displej na RGB rozhranie podporované mikrokontrolérom. Nakoniec bol zvolený displej DLC0430NZG s veľkosťou uhlopriečky 4.3 palcu a farebnou hĺbkou 24 bitov, pričom využívaných je len 16 z dôvodov spomenutých vyššie.

### **4.5 Modul WIFI**

WIFI začína byť čoraz viac rozšírený aj v priemyselných aplikáciách. Komunikácia riadiacej jednotky s inými zariadeniami bude možná nie len pomocou CAN rozhrania, ale aj WIFI. Druhým dôvodom zakomponovania modulu WIFI (SPWF01SA) do riadiacej jednotky je možnosť monitorovania a nastavovania ohrevu zo vzdialeného miesta. Vhodný modul WIFI bol zvolený na základe nasledujúcich kritérií:

- Dostatočná prenosová rýchlosť,
- Vysielací výkon,
- Malé rozmery.



**Obr. 8** Modul WIFI SPWF01SA [7]

Modul je dodávaný v niekoľkých variantách. Voliteľný je typ antény a veľkosť externej pamäte. Anténa môže byť keramická integrovaná na module alebo externá pripojená na UFL konektor. Indukčný ohrev je priemyselné zariadenie s kovovým krytom a z toho dôvodu bude zvolená druhá varianta. Modul WIFI navyše obsahuje aj externú pamäť na ukladanie dát, napr. na vytvorenie servera. Komunikácia s mikrokontrolérom je prostredníctvom zbernice UART.

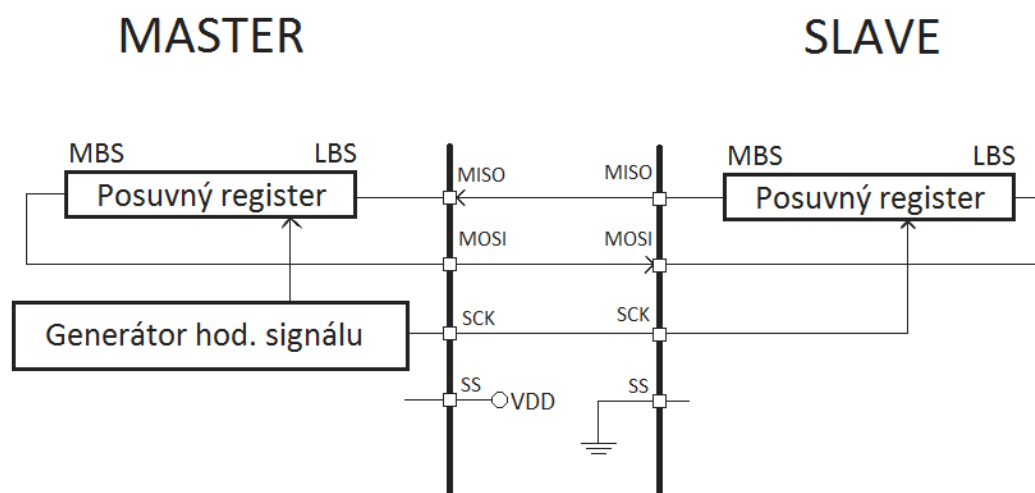
Modul obsahuje 32-bitový mikrokontrolér s jadrom ARM v ktorom je implementovaný TCP/IP protokol s pridaným web serverom. Riadiaca jednotka na komunikáciu s modulom bude využívať tzv. AT príkazy, ktoré uľahčujú prácu s modulom. Detailnejšie informácie je možné získať v katalógovom liste[7]

## 5 Popis použitých rozhraní

V tejto kapitole nájdete popis zberníc použitých v riadiacej jednotke pre komunikáciu medzi mikrokontrolérom a perifériami.

### 5.1 Rozhranie SPI

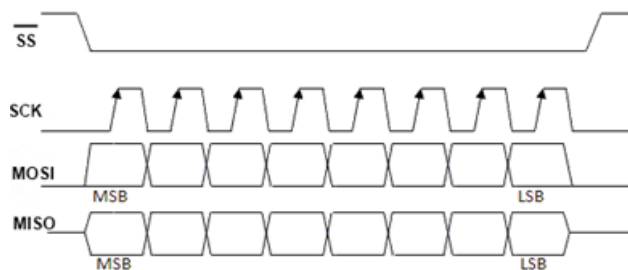
Zbernica patrí medzi často používané, najmä kvôli svojej jednoduchosti a relatívne vysokej prenosovej rýchlosti. V našom prípade tvorí rozhranie medzi externým analógovo-digitálnym prevodníkom a mikrokontrolérom. Na nasledujúcom obrázku je znázornené typické prepojenie zariadenia typu master so zariadením typu slave. Master predstavuje mikrokontrolér, pričom slave reprezentuje analógovo-digitálny prevodník. Obojsmerná komunikácia prebieha po trojvodičovej zbernici s využitím signálov MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave In), SCK (Clock) a pomocných signálov SS (Slave Select), ktoré slúžia na voľbu príslušného slave zariadenia adresovaného zariadením typu master. Na riadiacu jednotku je ale pripojené jediné zariadenie typu slave a preto nie je nutné využívať SS signál na výber konkrétneho zariadenia. Z toho dôvodu je možné SS pin na AD prevodníku trvale uzemniť ako je to znázornené na obr. 5. Rozhranie SPI je tvorené dvoma navzájom prepojenými posuvnými registrami. Master je zodpovedný za generovanie hodinového signálu počas ktorého sa vymieňa obsah oboch posuvných registrov. Ako už z označenia pinov vyplýva, Master posiela dáta cez MOSI pin a prijíma prostredníctvom MISO.



Obr. 9 Zapojenie SPI zbernice

V štandarde nie je presne špecifikované, či prvý vysielaný bit je LSB alebo MSB. Tento parameter je udaný v katalógovom liste analógovo-digitálneho prevodníku a podľa toho musí byť správne nakonfigurovaný mikrokontrolér. Vzorkovanie signálu na pinoch MISO a MOSI taktiež nie je presne stanovená protokolom SPI. Preto je nutné, aby bola táto konfigurácia

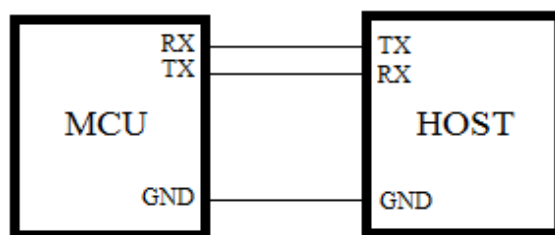
mikrokontroléru zhodná s konfiguráciou slave zariadenia podľa dokumentácie. Samotný protokol je znázornený na Obr. 10.



**Obr. 10** Protokol SPI [4]

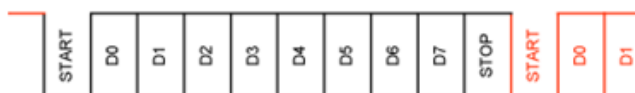
## 5.2 Rozhranie UART

Rozhranie predstavuje jednoduchú sériovú linku, ktorú je možno vnímať ako redukovanú verziu známeho rozhrania RS232. UART ale na rozdiel od RS232 využíva len dva vodiče nutné ku komunikácii. Názorná ukážka zapojenia je znázornená na Obr. 11.



**Obr. 11** Zapojenie UART

Výstup TX slúži na vysielanie dát a RX na prijímanie. Zariadenia sú teda schopné zároveň vysielat' a prijímať dáta. Na rozdiel od SPI rozhrania, UART nepoužíva CLK signál na synchronizáciu. Jedná sa o asynchrónnu komunikáciu, takže obe strany musia byť vopred nastavené na zhodnú prenosovú rýchlosť. Samotný protokol je vyobrazený na nasledujúcom obrázku.



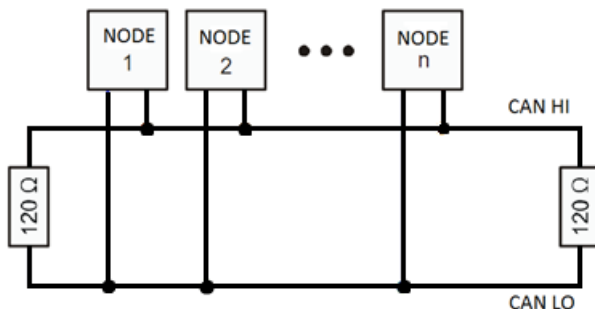
**Obr. 12** UART Protokol

Prenos dát začína Start bitom, teda prechodom z log. úrovne 1 do log. úrovne 0. Nasleduje osem dátových bitom a paket je ukončený stop bitom v log. úrovni 1. Paket môže obsahovať tiež paritný bit, ktorý ale nie je znázornený.



### 5.3 Rozhranie CAN

CAN protokol nachádza využitie prevažne v priemyselných aplikáciách, konkrétne v automobilovom priemysle, vo výrobných halách atď. CAN zbernica sa vyznačuje mnohými výhodami oproti iným zberniciam. Dáta sú prenášané dvoma vodičmi diferenciálnym párom podľa Obr. 13. Je teda odolná voči rušeniu a taktiež v sebe integruje detekciu chýb, kľúčovú pre bezpečnosť prenosu. CAN zbernica sa vyznačuje multi-master topológiou, čo znamená, že všetky zariadenia sú schopné autonómne vysielat'. Každé zariadenie pripojené na zbernicu je navyše schopné prijímať správy od ktoréhokoľvek zariadenia.

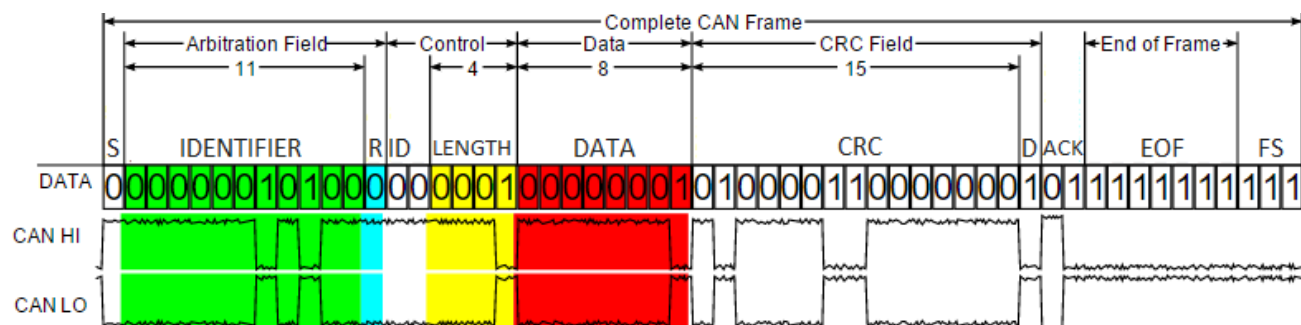


Obr. 13 Zapojenie CAN zbernice [8]

CAN paket je znázornený na Obr. 14. Každá správa pozostáva z nasledujúcich polí:

Tab. 4 CAN paket

START	štart bit
IDENFIFIER	identifikátor udáva unikátne číslo a prioritu správy
REMOTE/DATA	žiadosť o dáta, alebo posielanie dát
ID	udáva počet bitov identifikátoru. (11/29 bitov)
LENGTH	dĺžka dát
DATA	samotné dáta
CRC	kontrola správnosti zaslaných dát
ACK	spätná väzba o úspešnosti prenosu od zariadení prijímajúcich správu



Obr. 14 CAN Paket [8]

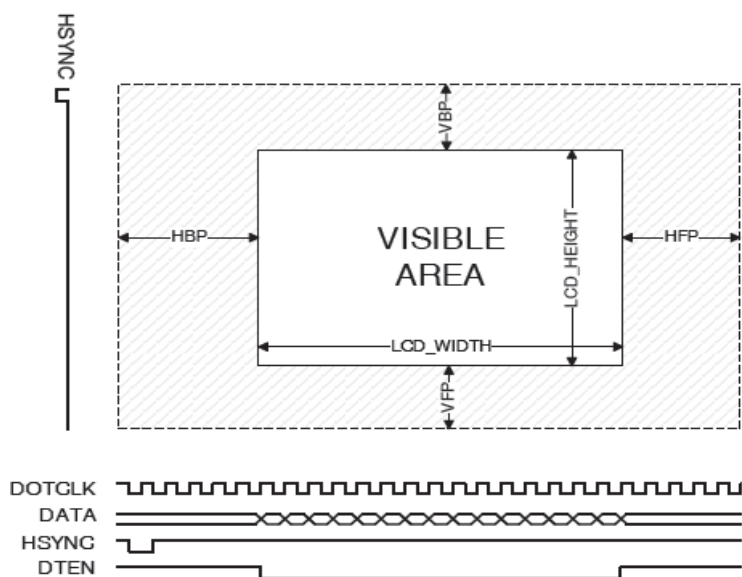
Bity označené písmenami D, EOF a FS neboli zmienené, pretože ich hodnota je vždy fixná.

Pred vysielaním správy jej zariadenie priradí identifikačné číslo. Podľa tohoto čísla sú schopné ostatné zariadenia pripojené na zbernicu odfiltrovať nežiadúce správy. Identifikátor ale navyše stanovuje prioritu správy. V prípade, že viac zariadení začne vysielat' správu v rovnaký čas, pochopiteľne len jedna správa môže byť vyslaná. Správa s najmenšou hodnotou identifikátoru má najväčšiu prioritu a ostatné zariadenie sa budú pokúšať posielat' správu neskôr. Bit označený písmenom R udáva, či daná správa je obsahuje dáta alebo nie. V druhom prípade sa jedná o tzv. remote správu a slúži väčšinou ako požiadavka o dáta od iných zariadení.

Špecifikácia CAN rozhrania špecifikuje dva druhy identifikátoru. 11-bitový znázornený na Obr. 14 a rozšírený 29-bitový pre náročné aplikácie. Nasleduje dĺžka dát v bajtoch a samotné dáta. CAN rozhranie v sebe zhŕňa CRC kontrolu, na detekciu chýb vzniknutých počas prenosu. Podľa úspešnosti prenosu vracajú zariadenia ACK bit. Správa je ukončená EOF (End Of Frame) bitmi.

## 5.4 Rozhranie RGB

V predchádzajúcej kapitole bolo naznačené, že na vykresľovanie TFT displeja bude využité RGB rozhranie podporované vybraným mikrokontrolérom. Časovanie je znázornené na Obr. 15 a obsahuje signály DOTCLK, DATA, DTEN, HSYNC a VSYNC, ktorý nie je vyobrazený.



Obr. 15 RGB rozhranie [9]

Signál VSYNC je generovaný na začiatku rámcu (novej obrazovky), podobne ako HSYNC je generovaný na začiatku každého riadku. Displej spravidla obsahuje viditeľnú a neviditeľnú oblasť. Neviditeľná oblasť je špecifikovaná veľkosťou VBP, VFP, HBP (Horizontal Back Porch), HFP (Horizontal Front Porch). Tieto parametre udávané výrobcom displeja je nutné

dodržať. Signál DOTCLK je neustále generovaný ale dáta sú zobrazované len v prípade, že signál DTEN je v log. úrovni 0, inak sú dáta ignorované. DATA reprezentuje signály určujúce farbu pixelu. V našom prípade bude privedených osem signálov na každú z farieb.

## 5.5 Rozhranie USB

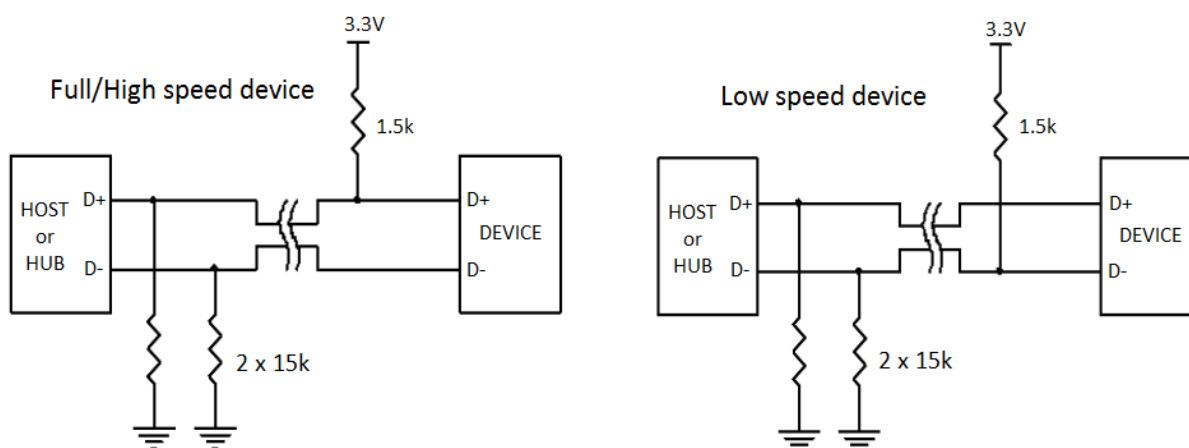
Riadiaca jednotka indukčného ohrevu bude obsluhovať USB zbernicu na komunikáciu s PC a USB kľúčom. Mikrokontrolér obsahuje USB OTG, ktorý k tomu použijeme.

Za posledných niekoľko rokov sa USB zbernica stala neodmysliteľnou súčasťou počítača a ostatných zariadení. Predchodca USB zbernice, sériová linka RS232 bola vytlačená kvôli veľkému počtu nedostatkov, ktoré USB eliminuje. Výhodou USB oproti RS232 je vysoká prenosová rýchlosť, robustnosť, možnosť pripojiť viac zariadení na jednu USB zbernicu, nie je nutné konfigurovať (napr. prenosovú rýchlosť), možnosť napájania, minimálny počet vodičov a mnoho ďalších. Každá USB zbernica obsahuje jedno zariadenie typu hostiteľ (master) a jedného alebo viacerých zariadení (slave).

USB 2.0 podporuje tri prenosové rýchlosti:

- Low speed            1.5 Mbit/s
- Full speed            12 Mbit/s
- High speed            480 Mbit/s

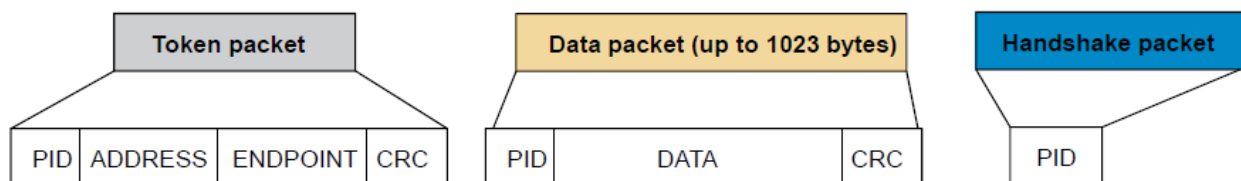
Konfigurácia zariadenie s nízkou prenosovou rýchlosťou (Low speed) je znázornená na Obr. 16 vpravo, zatiaľ čo zariadenie s vysokou prenosovou rýchlosťou (Full/High speed) je vľavo. Po pripojení zariadenia s vyššou prenosovou rýchlosťou začne hostiteľ komunikovať so zariadením s prenosovou rýchlosťou 12 Mbit/s a následne je počas inicializácie možné zvýšiť rýchlosť na 480 Mbit/s (v prípade, že podporované zariadením).



Obr. 16 Zapojenie USB zbernice [10]

Po pripojení zariadenia na USB zbernicu, hostiteľ automaticky detekuje jeho prítomnosť a prideli mu jedinečnú adresu v rámci zbernice. Každé zariadenie navyše obsahuje tzv. koncové body (endpoint) a tie spolu s adresou jednoznačne identifikujú funkciu zariadenia.

Koncový bod 0 musí obsahovať každé zariadenie, a slúži k prvej inicializácii (enumerácii) USB zariadenia po pripojení na zbernicu. Počas enumerácie sa nastavujú jednotlivé koncové body, ich smer (vstupný/výstupný), typ prenosu dát atď. Na Obr. 17 je znázornený zjednodušený USB paket.



**Obr. 17** USB paket [10]

- **Token packet**
  - PID                      udáva typ komunikácie (vstupná, výstupná, nastavenie)
  - ADDRESS              Adresa zariadenia pridelená hostiteľom
  - ENDPOINT              číslo koncového bodu s ktorým hostiteľ komunikuje
  - CRC                      CRC kontrola
- **Data packet**
  - PID                      slúži na synchronizáciu dát
  - DATA                  samotné dáta
  - CRC                      CRC kontrola
- **Handshake packet**
  - PID                      ACK, NAK, STALL NYET

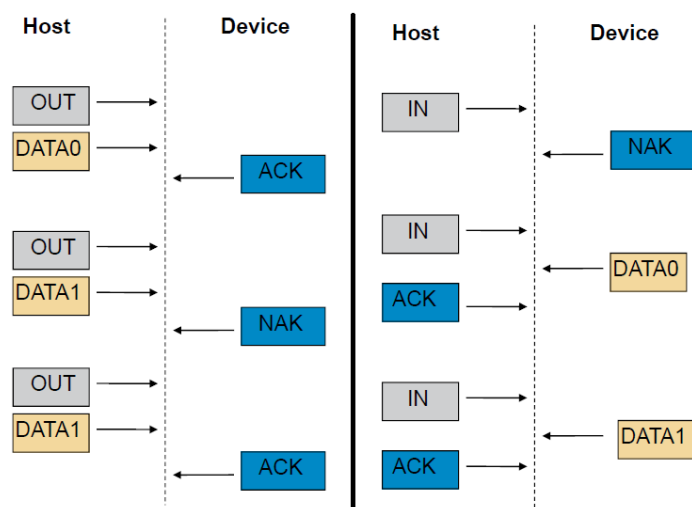
Token paket je vždy zaslaný hostiteľom. Je zložený z PID (Packet Identifier), určujúceho typ správy. Pomocou adresy a koncového bodu je jednoznačne určené zariadenie na zbernici a smer komunikácie. Token paket je ukončený CRC kontrolou.

Dátový paket taktiež obsahuje PID (DATA0, DATA1) slúžiaci na synchronizáciu komunikácie viz. Obr. 18. PID je nasledovaný dátami v rozsahu 1-2023 bajtov. Paket je zakončený CRC kontrolou podobne ako u token paketu.

Posledný je tzv. “Handshake“ paket vracajúci správu o stave prenosu: ACK potvrdzuje úspešné prijatie správy (od hostiteľa alebo zariadenia). NAK signalizuje zlyhanie posielania (len od zariadenia). STALL požiadavka nepodporovaná alebo koncový bod zastavený. NYET zariadenie nepripravené prijať ďalšie pakety (len pre prenosovú rýchlosť 480 Mbit/s)

Obr. 18 znázorňuje spôsob komunikácie medzi hostiteľom a zariadením. Ľavá strana obrázku vyobrazuje posielanie dát smerom od hostiteľa k zariadeniu. Po vyslaní dát, hostiteľ čaká na odpoveď zo strany zariadenia. ACK správou zariadenie potvrdí úspešné prijatie dát a naopak NAK správou signalizuje hostiteľovi neschopnosť prijatia dát a hostiteľ zahájí vysielanie dát neskôr. Na pravej strane je znázornený opačný smer prenosu. Hostiteľ pošle požiadavku na

prijatie dát a čaká na ACK. V prípade, vrátenia NAK správy sa pokúša poselať požiadavku neskôr.



**Obr. 18** Výmena dát na USB zbernici [10]

Hostiteľ je zodpovedný za pridelovanie času potrebného k prenosu dát pre jednotlivé zariadenia. USB protokol podporuje štyri typy prenosu dát:

- Control slúži na konfiguráciu (enumeráciu) zariadenia pro pripojení na zbernicu
- Bulk použité pre zariadenia bez garancie pravidelného prenosu dát
- Interrupt použité pre zariadenia s potrebou periodického vysielania/prijímania dát
- Isochronous podobné ako predchádzajúca, ale bez nutnosti kontroly prenosu dát

Kontrolný (Control) prenos je uskutočnený po pripojení zariadenia na USB zbernicu a slúži k enumerácii (konfigurácii) daného zariadenia. Počas enumerácie komunikuje hostiteľ s koncovým bodom 0.

Hromadný (Bulk) prenos je používaný pre prenos veľkého objemu dát, bez garancie periodického vysielania/prijímania. Tento typ prenosu dát nie je podporovaný na zariadeniach s nízkou prenosovou rýchlosťou a je často využívaný u zariadení ako tlačiarne, USB kľúče a podobne.

Prerušovaný (Interrupt) prenos sa používa na periodický prenos dát s maximálnou dobou periódy určenej počas enumerácie zariadenia. Typickou aplikáciou tohoto typu prenosu je obsluha klávesnice a myši, kde nie je vyžadovaný vysoký objem dát, ale pravidelná odozva.

Posledným typom prenosu je izochrónny (Isochronous). Vyznačuje sa obdobnými vlastnosťami ako prerušovaný prenos, ale z dôvodu zvýšenia prenosovej rýchlosti je odstránená detekcia chýb. Tento druh prenosu je ideálny pre audio a video aplikácie, kde je občasná chyba prijateľná.

## 6 Softvérové komponenty

V tejto kapitole sa zameriame na popis vybraných komponentov softvérovej realizácie, ktoré sú verejne dostupné a často využívané vo vstavaných systémoch s mikrokontrolérmi. Konkrétne sa jedná o operačný systém reálneho času (RTOS), grafickú knižnicu emWin a súborový systém nazývaný FAT systém. Vymenovaný softvér je voľne distribuovateľný.

### 6.1 Operačný systém reálneho času

Bežné počítače majú operačný systém, ktorého odozva na vstup (napríklad stisk klávesy alebo kliknutie myši) je rádovo v jednotkách až desiatkach milisekúnd. V prípade osobného počítača to neprekáža, ale vo vstavaných systémoch s mikrokontrolérmi to je často neprijateľné. Za týmto účelom boli vytvorené operačné systémy reálneho času (ďalej len RTOS). Je špeciálne navrhnutý a optimalizovaný na rýchlu reakciu zmeny vstupných podnetov. Systém je potom schopný reagovať v rádovo jednotkách mikrosekúnd. Operačné systémy reálneho času sa delia do dvoch skupín:

Soft RTOS – u tohto systému nie je nutné časové intervaly dodržať presne a ich nedodržanie nevedie k vážnym nedostatkom. Stačí aby požiadavky boli splnené vo vopred definovanom časovom okne.

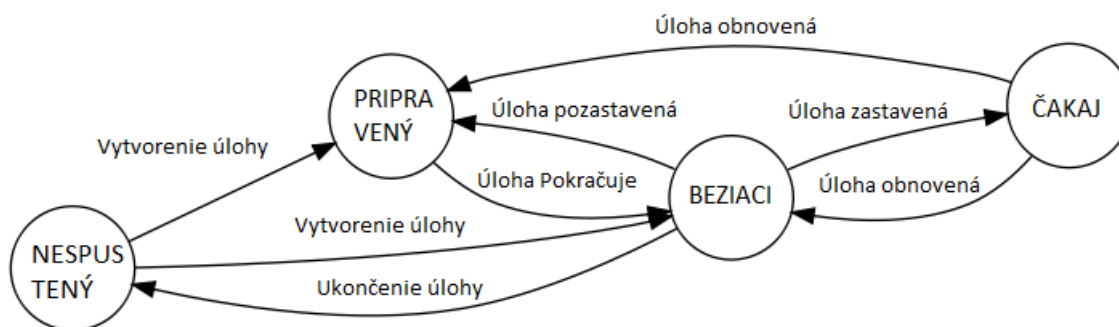
Hard RTOS – tento systém musí byť bezpodmienečne zaistiť dodržanie časových parametrov, teda reakciu na určitý podnet. Nesplnenie tohto požiadavku by viedlo k zlyhaniu celého systému.

Pri vývoji aplikácie s mikrokontrolérom nie je nutné použiť operačný systém. V takom prípade sa jedná o tzv. “polling“ systém a program sa vykonáva s nekonečnom cykle, pričom mikrokontrolér je na podnet na vstupe často upozornený prostredníctvom prerušenia. Jedným z nevýhod takéhoto prístupu je, že systém nereaguje na udalosti podľa ich priority. Tento nedostatok a mnoho ďalších môže byť eliminovaný použitím správneho RTOS.

Výhody RTOS:

- efektívnejšie vyťaženie procesora,
- jednoduchšie zdieľanie zdrojov,
- prispieva k modularite programu,
- jednoduchší vývoj a údržba aplikácie,

Aplikácia vyvíjaná na báze operačného systému je logicky rozdelená do niekoľkých úloh. Každá z úloh vykoná určitú časť programu. RTOS disponuje plánovačom úloh, ktorý zaistí, že v každom okamžiku je vykonávaná úloha s najvyššou prioritou. Medzi jednotlivými úlohami je možné vytvoriť synchronizáciu alebo iný druh komunikácie.



**Obr. 19** Stavový automat úloh

Na Obr. 19 je vyobrazený stavový automat znázorňujúci rôzne stavy, ktoré môže úloha nadobudnúť. Po zapnutí sú všetky úlohy v nespustenom stave. Po vytvorení úlohy sa dostáva do stavu pripravený alebo bežiaci podľa toho, či je akurát bežiaci nejaká iná úloha s vyššou prioritou. Bežiaci úloha sa dostáva do stavu pripravený v prípade, že je nutné obslúžiť inú s vyššou prioritou. Ak úloha momentálne čaká na určitý podnet, tak sa nachádza v stave čakaj. Každá úloha má stanovenú prioritu definovanú bežne pri inicializácii.

Synchronizácia a komunikácia medzi jednotlivými úlohami sa vykonáva prostredníctvom nasledujúcich mechanizmov:

- signály,
- správy,
- fronty,
- semaforey.

Signál je najjednoduchší spôsob komunikácie medzi úlohami. Úloha zasielajúca signál jednej alebo viacerým úlohám oznamuje skutočnosť, že došlo k určitej udalosti. Súčasťou signálu je väčšinou informácia o akú udalosť sa jedná. Túto funkcionality je možné s výhodou použiť napríklad pri stisku tlačidla. Úloha snímajúca stisk tlačidiel následne oboznamuje vybrané úlohy o ich stave tlačidiel.

Zasielanie správ je ďalším spôsobom komunikácie, ktorý je použiteľný v prípade, že udalosť posielala správu o definovanej veľkosti inej úlohe. Príkladom môže byť napr. zaslanie nameranej hodnoty analógovo-digitálnym prevodníkom inej úlohe zodpovednej za spracovanie tohto údaju.

Fronta je špeciálny druh správy. Správy sú ukladané v kruhovej vyrovnávacej pamäti.

Semafore sú mechanizmus poskytovaný operačným systémom predovšetkým na kontrolu prístupu ku zdieľaným zdrojom. Využitie je možné nájsť v synchronizácii medzi prerušením a úlohou, alebo synchronizáciou medzi jednotlivými úlohami.

Pri výbere vhodného operačného systému reálneho času pre našu aplikáciu boli brané do úvahy nasledovné parametre:

- rýchlosť prepínania úloh,
- podpora použitého mikrokontroléru,
- veľkosť operačného systému,
- prítomnosť potrebných funkcionalít,
- voľne distribuovateľný softvér.

Podľa zmienených parametrov bol zvolený ChibiOS, poskytujúci najvyšší výkon z pomedzi neplatených operačných systémov reálneho času.

## 6.2 Grafická knižnica

Ako už bolo naznačené v jednej z predchádzajúcich kapitol, použitý mikrokontrolér obsahuje grafický akcelerátor, ktorého úlohou je hlavne generovať signály na riadenie displeja prostredníctvom RGB rozhrania. Ďalej okrem iného umožňuje kopírovanie dát (grafického obsahu) z pamäte na display, čím je dosiahnuté zobrazovanie požadovaného obsahu, ale na vytvorenie samotného grafického obsahu je použitá grafická knižnica emWin od spoločnosti SEGGER.

Jedná sa o generickú grafickú knižnicu, určenú predovšetkým pre mikrokontroléry. Je možné ju jednoducho naadaptovať na väčšinu 8, 16 a 32-bitových mikrokontrolérov. V našom prípade to znamenalo zmenu vybraných funkcií tak, aby bola podporená hardvérová akcelerácia zmeny formátu obrázkov, kopírovania dát a iných funkcií. Ďalej je nutné nastaviť parametre špecifické pre konkrétny hardvér, ako je napríklad rozlíšenie displeja, orientáciu displeja, farbu pozadia a iné.

Výhodou knižnice je podpora veľkého počtu grafických objektov, ktoré je možné zobrazovať na displeji, jednoducho volaním vhodnej funkcie. Medzi najčastejšie používané funkcionality patria nasledovné:

- zobrazovanie kruhu, obdĺžniku, polygónu, čiary, bodu a mnoho ďalších,
- zobrazovanie textu a čísel,
- zobrazovanie obrázkov,
- správa okien,
- používanie viacnásobnej vyrovnávacej pamäti,
- vyhladenie.

Vykresľovanie jednoduchých grafických objektov ako napr. obdĺžniku, kruhu a iných je často používaná funkcia.

Podobne tak i vypisovanie textu a čísel. To je možné jedným z preddefinovaných fontov alebo vlastným fontom, vygenerovaným pomocou externého programu dodávaným firmou



SEGGER, autorom grafickej knižnice emWin. Tento program konvertuje ľubovoľný font do bitovej mapy. Pri konverzii je možné nastaviť niekoľko parametrov, medzi ktoré patrí aj veľkosť textu a úroveň vyhladenia (antialiasing), ktorému sa budeme venovať ďalej v tejto kapitole.

Zobrazovanie obrázkov možné taktiež jednoduchým volaním funkcie. EmWin momentálne podporuje vykresľovanie obrázkov vo formáte PNG, JPEG, GIF a BMP (bitová mapa). Výhodou obrázku v komprimovanom formáte je menšia veľkosť, ale na druhej strane je nutné softvérovo dekodovať (ak mikrokontrolér neobsahuje hardvérový dekodér) každý obrázok počas behu programu. Na niektorých mikrokontroléroch to môže znamenať výpočtovo náročnú operáciu a preto sa často používajú obrázky formátu BMP. Na konvertovanie obrázku do bitovej mapy firma SEGGER zase poskytuje externý program. Pomocou neho je možné vytvoriť bitovú mapu s ľubovoľnou veľkosťou, farebnou škálou, rotáciou a priehľadnosťou. Program vygeneruje súbor s príponou .c, obsahujúci bitovú mapu. Týmto spôsobom je jednoduché daný obrázok zakomponovať do projektu a pracovať s ním.

Ďalšou často používanou funkciou je správa okien. Okno je možné si predstaviť ako obdĺžnikovú oblasť na displeji, kde zobrazujeme požadované objekty a text, podobne ako dobre známom prostredí Windows. Ukážka prekrývajúcich sa okien je znázornená na Obr. 20.



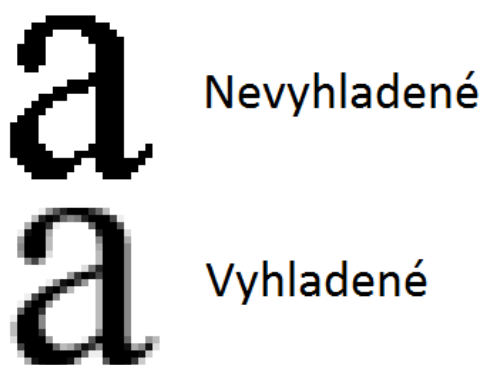
**Obr. 20** Ukážka okien [11]

Jednotlivé okná je možné vytvárať, umiestniť a zatvárať. EmWin automaticky zobrazuje okná v správnom poradí tak, aby boli vybrané okná v popredí a ostatné v pozadí. Týmto spôsobom je relatívne jednoduché vytvoriť komplexnejšiu grafiku s minimálnou námahou.

Grafická knižnica podporuje tzv. “multi buffering“, teda viacnásobnú vyrovňavacu pamäť na prácu s grafickým obsahom. To znamená, že obsah, ktorý je zobrazuje na displej je duplikovaný. Mikrokontrolér neustále zobrazuje grafický obsah uložený v pamäti. Takto je možné jeden obsah kopírovať na displej a zároveň na druhom vykonávať potrebné zmeny, napr. vykresľovanie obrázku alebo zmenu číslice. Po vykonaní všetkých operácií sa začne zobrazovať na displej nový grafický obsah a tým sú eliminované rôzne nežiadúce grafické

efekty, ktoré by mohli vzniknúť počas pomalého prekresľovania grafického obsahu momentálne zobrazovaného na displej.

Text vykreslený na displeji s menším rozlíšením môže pôsobiť nekvalitne a preto sa používa technika vyhladzovania tzv. “anti-aliasing“. Ukážka vyhladenia je možné vidieť na Obr. 21. Za účelom eliminácie (minimalizované) hrán, je samotný objekt obklopený menej výraznou farbou. Na obrázku je znázornené písmeno, ktorého hrany sú opticky menšie, pridaním niekoľkých pixelov v odtieni šedej v jeho okolí. Takýto text je možné generovať už spomínaným konvertovacím programom. Tento princíp sa dá využiť nie len u textu, ale napríklad aj pri zobrazovaní obrázkov.



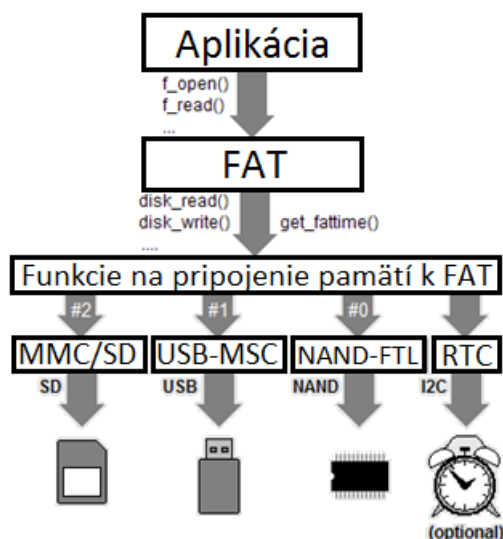
**Obr. 21** Vyhľadovací efekt [12]

### 6.3 FAT systém

FAT systém predstavuje súborový systém používaný pôvodne na prvých verziách operačného systému MS-DOS a Microsoft Windows. Systém obsahuje FAT tabuľku, ktorá definuje ktoré sektory pamäte sú voľné, ktoré sú použité, pre ktorý súbor, v akom poradí za sebou nasledujú atď. Predmetom tejto kapitoly nie je vysvetliť celý princíp súborového systému, ale poukázať na to, akým spôsobom sa dá adaptovať na našu aplikáciu.

Pamäťové médiá sú väčšinou rozdelené do tzv. sektorov, pričom každý sektor má stanovenú veľkosť. My používame paralelnú NAND FLASH pamäť, ktorej veľkosť jedného sektoru sú 2 KB. FAT systém je distribuovaný ako generická knižnica. Pre každé pamäťové médium je špecifické, ako pristupuje k jeho obsahu. Aby sme boli schopný vytvoriť súborový systém na danom pamäťovom médiu, musíme FAT systému poskytnúť prístupové funkcie. A to na predovšetkým čítanie a zápis sektoru.

Na Obr. 22 je znázornené prepojenie aplikačného programu s jednou alebo viacerými externými pamäťami prostredníctvom FAT systému. Aplikácia volá štandardné funkcie ako `f_open`, `f_write`, `f_read` atď. FAT systém následne komunikuje s konkrétnym pamäťovým médiom. Z toho dôvodu je nutné implementovať už spomínané prístupové funkcie na čítanie a zápis sektorov. Na Obr. 22 sú pre ilustráciu znázornené tri médiá, pričom my používame súborový systém len pre NAND FLASH a USB kľúč.



**Obr. 22** Prepojenie aplikácie s FAT systémom a pamäťami [13]

V Tab. 5 je zhrnutá väčšina funkcií vyžadujúcich FAT systémom. Po zakúpení USB kľúču je na ňom už vytvorený súborový systém a preto pre prístup k dátam nie je nutné implementovať všetky funkcie, ale len funkcie nachádzajúce sa v prvých dvoch riadkoch tabuľky. Naopak je tomu u internej NAND FLASH pamäti, kde je nutné FAT systém vytvoriť a je teda je treba implementovať prvé štyri kolónky z tabuľky.

**Tab. 5** Funkcie potrebné pre FAT systém

FUNKCIA	POTREBNĚ KEĎ
disk_status disk_initialize disk_read	VŽDY
disk_write get_fattime (VOLITEĽNÉ) disk_ioctl (CTRL_SYNC)	_FS_READONLY == 0
disk_ioctl (GET_SECTOR_COUNT) disk_ioctl (GET_BLOCK_SIZE)	_USE_MKFS == 1
disk_ioctl (GET_SECTOR_SIZE)	_MAX_SS != _MIN_SS
disk_ioctl (CTRL_TRIM)	_USE_TRIM == 1

Popis uvedených funkcií:

- **disk\_status** – vracia aktuálny stav pamäťového média
- **disk\_initialize** – Inicializuje FAT systém pre dané pamäťové médium. Táto funkcia je súčasťou funkcie **f\_mount**
- **disk\_read** – určené k čítaniu dát, jedného alebo viacerých sektorov z daného pamäťového média
- **disk\_write** – určené k zápisu dát, jedného alebo viacerých sektorov z daného pamäťového média

- `disk_ioctl` – funkcia kontrolujúca vlastnosti špecifické pre dané médium. Z tabuľky je zrejmé že vracia parametre ako veľkosť sektoru, veľkosť bloku, počet sektorov atď. Tie sú nutné pri vytváraní súborového systému
- `get_fattime` – táto funkcia oznamuje FAT systému aktuálny čas dátum.

Bližšie informácie je možné nájsť v uvedenom zdroji.

## 7 Praktická realizácia

V tejto kapitole prejdeme celým procesom vývoja riadiacej jednotky indukčného ohrevu od návrhu schémy zapojenia, cez návrh dosky plošného spoja, vybrané časti softvérovej realizácie až po praktickú realizáciu.

### 7.1 Návrh schémy zapojenia

Vývoj nového zariadenia bežne začína návrhom hardvéru. Prvým krokom je stanovenie funkcií, ktoré bude zariadenie vykonávať a podľa toho vybrať vhodné komponenty, z ktorých bude systém pozostávať. O výbere vhodných komponentom bolo podrobne pojednávané v predchádzajúcich kapitolách a preto sa teraz zameriame na dôležité časti návrhu schémy. Kompletnú schému zapojenia nájdete v prílohe 1.

Pri komunikácii Mikrokontroléru s displejom a externými pamäťami je nutné dodržať presné časové parametre. Z toho dôvodu nie je vhodné používať interný RC oscilátor a bol použitý presný externý kryštál o frekvencii 12 MHz. Jednou z požiadaviek na riadiacu jednotku bola schopnosť uchovávať aktuálny čas a dátum a preto obvod doplnený ešte ďalším externým 32 kHz oscilátorom pre čítač reálneho času.

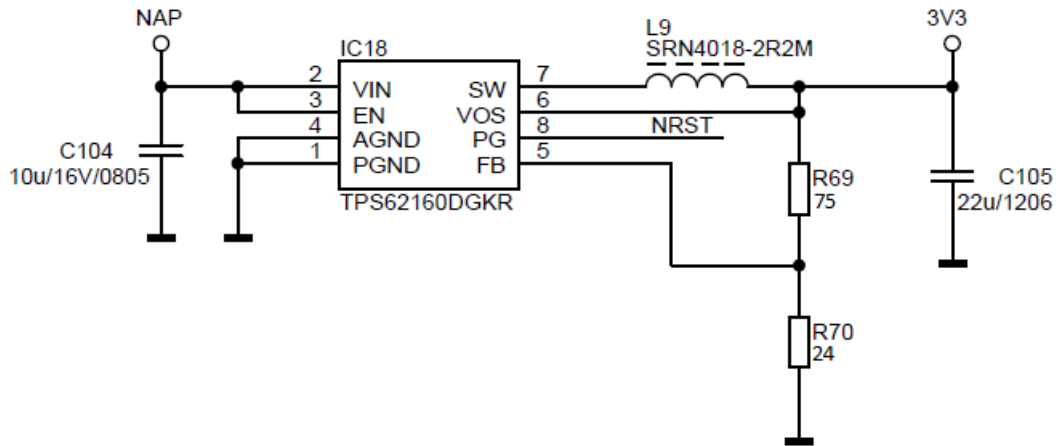
Na schéme si môžete všimnúť, že mikrokontrolér je programovateľný cez SWD rozhranie. Pri bežnom ladení programu sú využívané signály SWCLK a SWDIO pre vyčítanie, prípadne zápis dát do mikrokontroléru. Tento spôsob disponuje jednou nevýhodou, ktorou je relatívne malá prenosová rýchlosť. Tento problém môže byť vyriešený doplnením signálu SWO, ktorý funguje ako rýchla jednosmerná linka sériová linka, umožňujúca rýchle vyčítanie dát až 2 Mbit/s.

Použitý TFT displej obsahuje 24 signálov dedikovaných na prenos farby. Na schéme je možné si všimnúť, že 8 signálov nepoužívame a sú konštantne pripojené na zem. Zobrazované grafické objekty sú v už spomínanom formáte RGB565 a teda LSB bity každej farby nie sú podstatné.

Riadiaca jednotka obsahuje tri identické obvody na meranie teploty termočlánkami. Aby sme dosiahli uspokojujúcu presnosť meranej veličiny, bolo nutné galvanicky izolovať analógovú a digitálnu časť obvodu. Integrovaný obvod ADUM5401 je 4-kanálový izolátor s integrovaným DC/DC meničom rieši daný problém. Štyri kanále využité na komunikáciu mikrokontroléra s analógovo-digitálnym prevodníkom a DC/DC menič napája analógovú časť tohto obvodu. Pre presnosť dostatočnú presnosť nerania je navyše kľúčový aj návrh dosky plošného spoja, ktorému je venovaná nasledujúca podkapitola.

Pozornosť bola taktiež venovaná návrhu napájacích zdrojov. Riadiaca jednotka v sebe zahŕňa tri impulzné zdroje, ktoré vytvárajú všetky nevyhnutné napájacie napätia. Ako už bolo v jedenej z predchádzajúcich kapitol naznačené, zariadenie je napájané buď z 5 alebo 12

voltov. Digitálne obvody sú napájané z 3,3 voltovej vetvy, takže na zníženie napätia je použitý znižujúci DC/DC menič, ktorého výstupné napätie je nastaviteľné spätnoväzobnými rezistormi. Na Obr. 23 je znázornené zapojenie znižujúceho meniča s konkrétnymi hodnotami rezistivity.

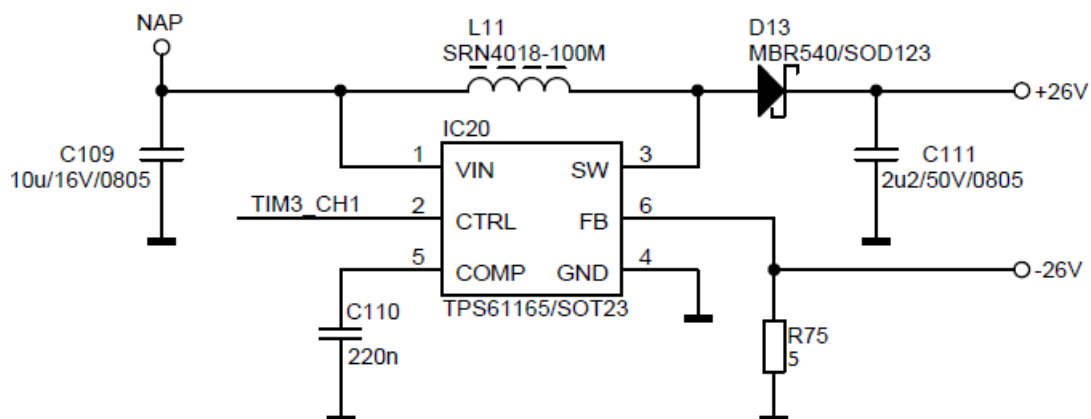


**Obr. 23** Schéma zapojenia znižujúceho meniča

Výrobca udáva v technickej dokumentácii fixné spätnoväzobné napätie na pine FB o úrovni 800 mV. Použitím Ohmovho zákona po jednoduchšej matematickej úprave dostávame vzťah pre výpočet odporového deliča:

$$R69 = R70 * \left( \frac{V_{vyst}}{V_{ref}} - 1 \right) = 24 * \left( \frac{3,3}{0,8} - 1 \right) = 75 \Omega$$

Znižujúci menič na 12 V bol navrhnutý podobnou metódou. Podsvietenie TFT displeja vyžaduje približne 26 V. Podsvietenie zložené z LED diód je vhodné napájať zdrojom konštantného prúdu, aby nedochádzalo ku zmene svietivosti podsvietenia vplyvom zmeny teploty polovodičovej štruktúry LED diód. Schéma zapojenia zvyšujúceho DC/DC meniča vidíte na



**Obr. 24** Schéma zapojenia zvyšujúceho meniča

Podsvietenia je displeja je pripojené na +26 V a teda prechádzajúci prúd LED diódami vytvára úbytok napätia na rezistore R75. Na základe výrobcom udávaného spätnoväzobného napätia 200 mV je opäť vhodné aplikovať Ohmov zákon pre výpočet rezistoru.

$$R_{75} = \frac{V_{ref}}{I_{led}} = \frac{200 \text{ mV}}{40 \text{ mA}} = 5 \Omega$$

Nominálny prúd tečúci LED diódami bol zvolený 40 mA, teda doporučená hodnota výrobcom.

## 7.2 Návrh dosky plošného spoja

Táto podkapitola bude venovaná návrhu DPS. Nebolo so síce predmetom tejto práce, ale počas vývoja došlo k úzkej spolupráci pri návrhu dosky plošných spojov s externým pracovníkom firmy DAWELL. Neosadené DPS je možné vidieť v prílohe 2. Návrh bol zahájený napájacou časťou obvodu.

Všetky impulzné zdroje a hlavne tie, s vysokou pracovnou frekvenciou a s veľkým pracovným prúdom je návrh DPS rozhodujúcim faktorom pre kvalitu napájacieho obvodu. Nedodržaním správnych návrhových techník by mohol byť obvod nestabilný alebo by to spôsobilo veľké zvlnenie výstupného signálu, čo je samozrejme nežiadúce. Prvým krokom ku správne návrhu bolo minimalizovať dĺžku spojov, a prispôbiť ich šírku k prúdovej hustote tak, aby nedochádzalo k nežiadúcemu úbytku napätia na cestách. Dĺžka spojov bola optimalizovaná hlavne priblížením externých komponentov k tesnej blízkosti DC/DC meniča.

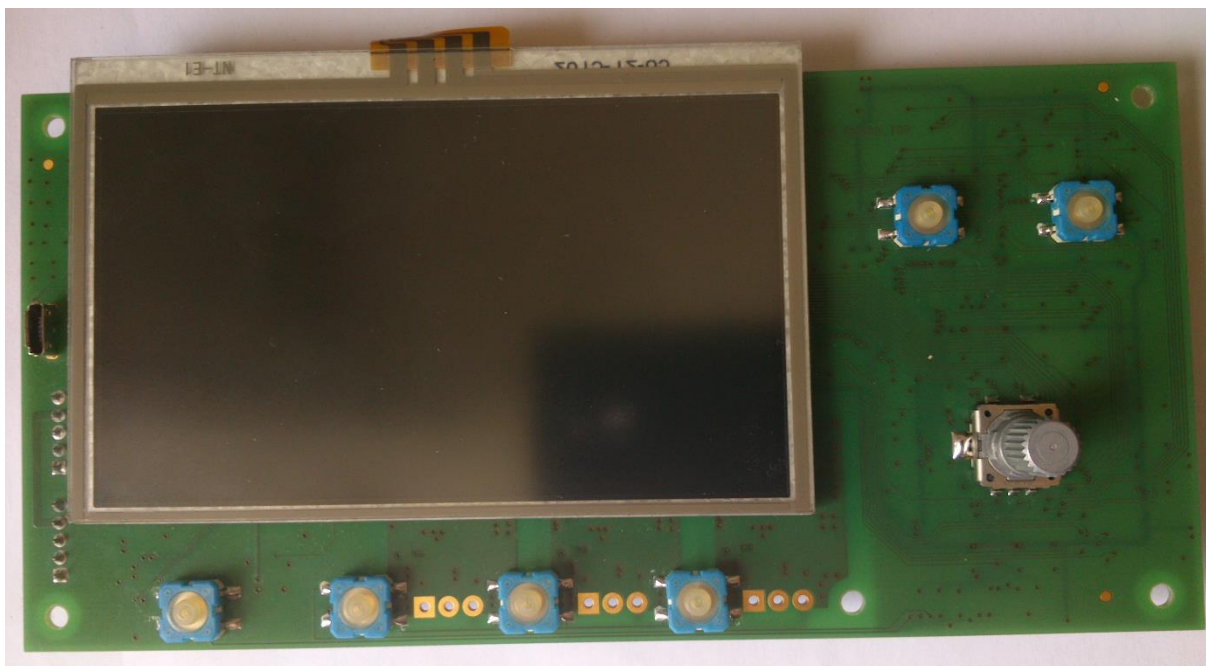
Ďalšou kritickou časťou bol návrh obvodu spracovania signálu z termočlánkov, skladajúci sa z troch identických blokov. Správny návrh je kľúčový pre dosiahnutie požadovanej presnosti spracovaného signálu. Integrovaný obvod ADS1220 integruje okrem štvorkanálového 24-bitového prevodníku aj presný teplotný senzor určený na kompenzáciu studeného spoja. Aby bola zaručená správna funkcia, musí byť prevodník umiestnený v bezprostrednej blízkosti konektoru ku ktorému je pripojený termočlánok. Navyše teplota nesmie byť ovplyvňovaná okolitými obvodmi a z toho dôvodu musí byť kvalitne vytvorený tzv. tepelný most medzi konektorom a prevodníkom. Obvod je na spracovanie signálu z termočlánkov musí byť navyše galvanicky oddelený od digitálnych obvodov a preto bola zvolená dostatočná izolačná medzera medzi nimi.

Menej rozhodujúci bol návrh digitálnej časti, pozostávajúca sa hlavne z prepojenia mikrokontroléra s externými pamäťami a TFT displejom. Aby to bolo dosiahnutá eliminácia rušenia okolitých obvodov, dĺžka vodičov musí byť minimalizovaná. Táto požiadavka bola bez problémov splniteľná v prípade prepojenia mikrokontroléra a pamätí, ale konektor displeja mal fixne stanovenú polohu na DPS. Umiestnenie komponentov na doske plošných spojov bolo preto ovplyvnené touto skutočnosťou, čoho výsledkom je kompromis medzi dĺžkou spojov medzi mikrokontrolérom a displejom a ideálnym rozmiestnením komponentov na DPS.

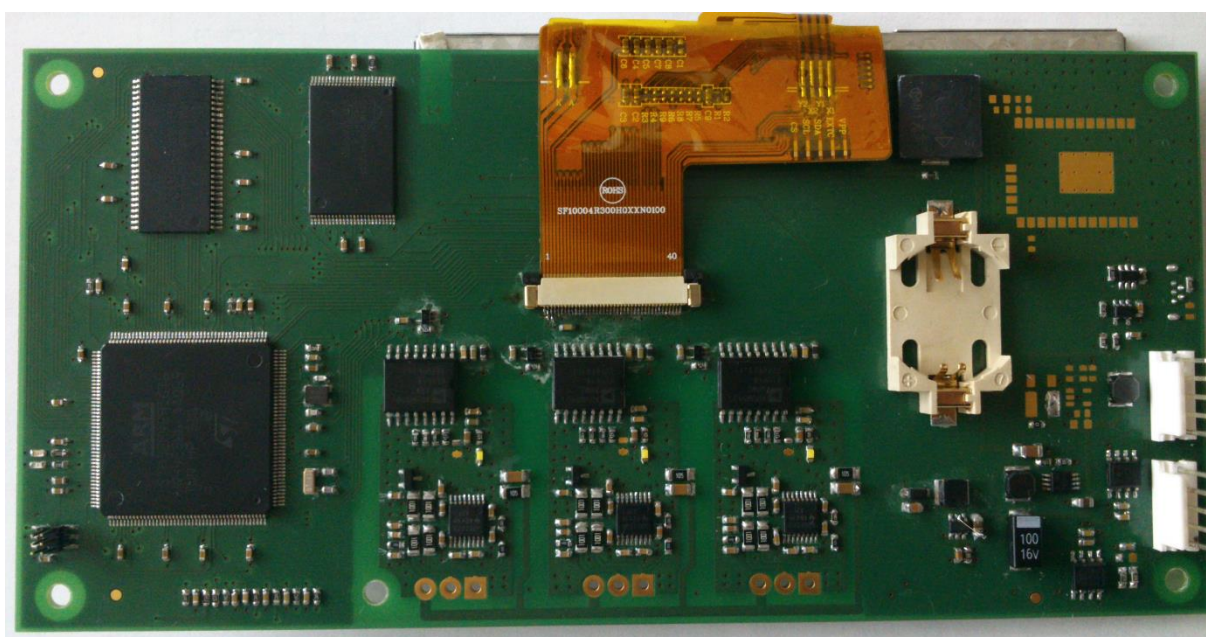


V neposlednom rade boli na DPS vhodne umiestnené filtračné a lokálne kondenzátory. Filtračné kapacity slúžiace prevažne ako filter pre napájanie celej dosky a lokálne kapacity slúžiaci ako lokálny zdroj energie pre súčiastky a redukuje impulzné prúdy, ktoré by inak pretekali celým DPS.

Na Obr. 25 a Obr. 26 je vyobrazená osadená doska plošných spojov z oboch strán.



**Obr. 25** Osadená doska plošného spoja (horná strana)



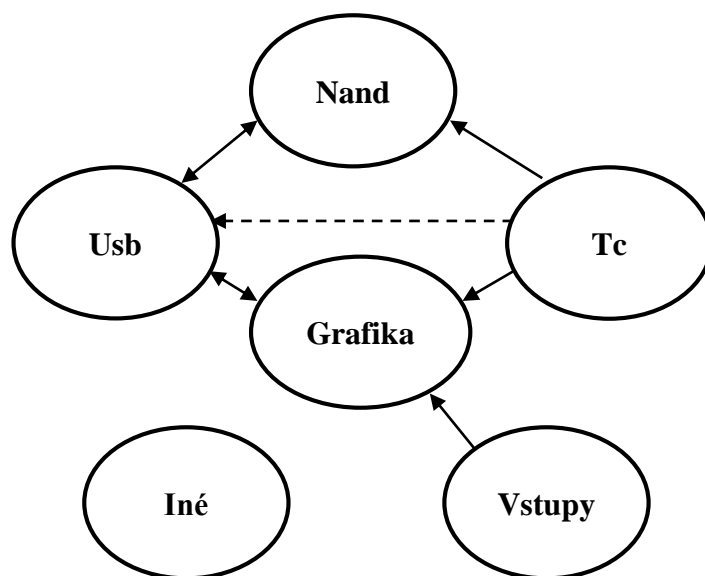
**Obr. 26** Osadená doska plošného spoja (spodná strana)



### 7.3 Softvérová realizácia

Podkapitola je venovaná softvérovej realizácii, ktorá tvorí majoritnú časť vývoja riadiacej jednotky. Kompletný zdrojový kód je možné vidieť v prílohe 5. Program je písaný výlučne v programovacom jazyku C, teda najčastejšie používaným jazykom je vstavaných systémov obsahujúcich mikrokontrolér. Navyše prevažná väčšina knižníc vrátane tých, ktoré boli predmetom predchádzajúcej kapitoly je napísaná v jazyku C. Pre vývoj bolo použité vývojové prostredie IAR Embedded Workbench.

Ako už bolo niekoľkokrát spomenuté, z dôvodu zjednodušenia vývoju, bol použitý operačný systém reálneho času. Celý program riadiacej jednotky bol teda rozdelený do viacerých blokov resp. úloh. Každá z nich má riešiť dielčiu časť problému. Obr. 27 znázorňuje jednotlivé úlohy a interakciu medzi nimi pomocou šípok.



**Obr. 27** Rozdelenie úloh

Úloha s názvom **Grafika** je zodpovedná za zobrazovanie grafického obsahu na TFT displej. Tá používa na zobrazovanie grafických objektov už zmienenú knižnicu emWin. Grafický obsah zobrazovaný na displej je závislý na signáloch a správach, pomocou ktorých komunikuje táto úloha s ostatnými úlohami.

Ďalšou dôležitou úlohou je **Vstup**, slúžiaca na snímanie užívateľských vstupov, ktorými sú tlačidlá a rotačný enkodér. Po detekcii stisku, pridržaní jedného z tlačidiel alebo zmene polohy enkodéru, zasiela odpovedajúci signál danej úlohe.

**Tc** vykonáva funkciu zberu dát z jedného alebo viacerých termočlánkov. Dáta sú získavané z troch analógovo-digitálnych prevodníkov za pomoci SPI zbernice. Tieto hodnoty sú následne podľa potreby vyfiltrované a prepočítané na konkrétnu teplotu. Tá je zase zaslaná prostredníctvom správy úlohe zobrazujúcej namerané hodnoty a prípadne úlohám, ktoré ukladajú namerané hodnoty na pamäťové médium.

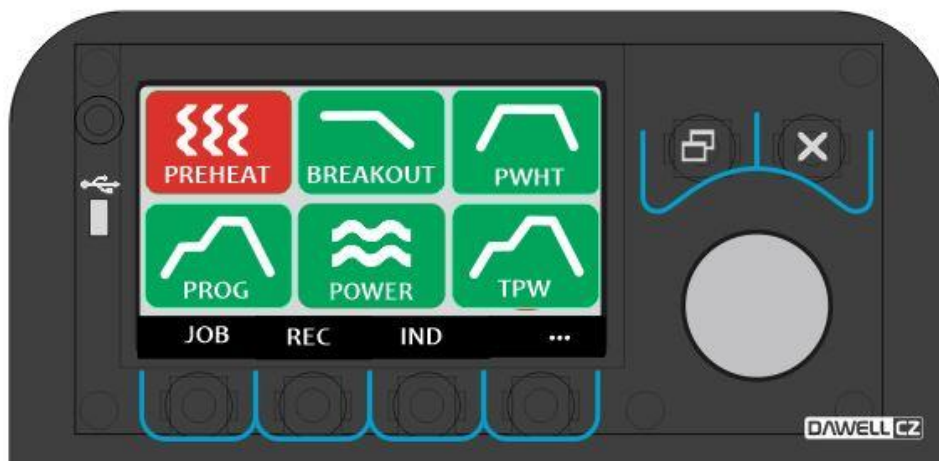
**Nand** a **Usb** slúžia na ukladanie dát na pamäťové médiá. K obom pamätiam sa pristupuje pomocou FAT systému. Tým pádom je jednoduché k nameraným dátam pristupovať a vizualizovať ich na PC.

V poslednej úlohe s názvom **Iné** sú zaradené ostatné aktivity vykonávané riadiacou jednotkou. Sem patrí napr. varovná signalizácia piezo meničom v prípade havarijného stavu, ovládanie LED diód atď.

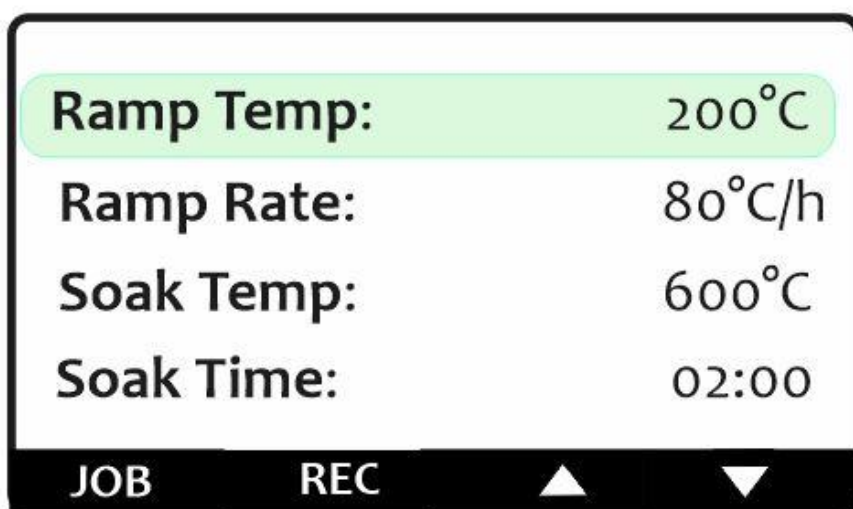
Následne bude doplnená ďalšia úloha, ktorá bude komunikovať s výkonnou časťou.

## 7.4 Praktická ukážka

V tejto podkapitole je možné vidieť dosiahnuté výsledky. Grafické užívateľské rozhranie bolo vytvorené na základe podkladov (návodu na použitie) poskytnutých firmou DAWELL. Návod na použitie je doložený v prílohe 4. Ten poskytuje informácie o vzhľade jednotlivých obrazoviek a zoznam nastaviteľných parametrov pre každý preddefinovaný profil ohrevu. Na Obr. 28 je vyobrazený orientačný náčrt predného panelu prístroja, na ktorom je viditeľné umiestnenie tlačidiel, rotačného enkodéra, USB konektoru a grafického displeja.

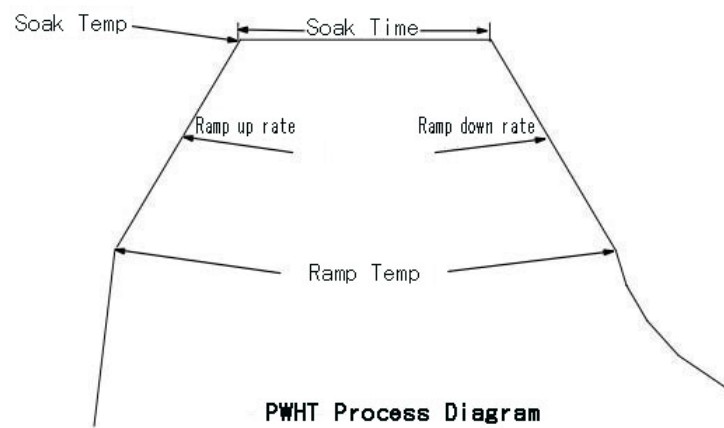


**Obr. 28** Predný panel prístroja s úvodnou obrazovkou

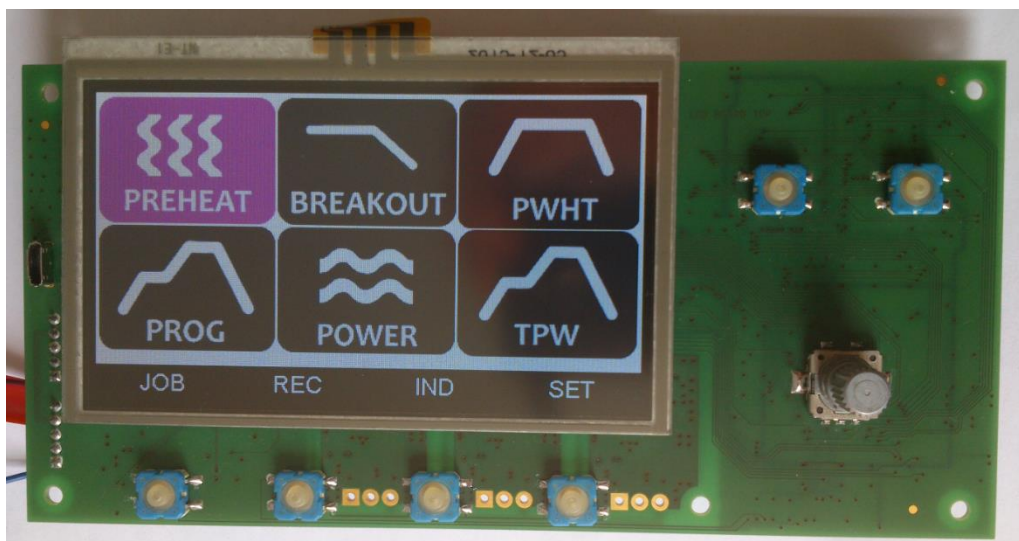


**Obr. 29** Ukážka obrazovky s nastaviteľnými parametrami

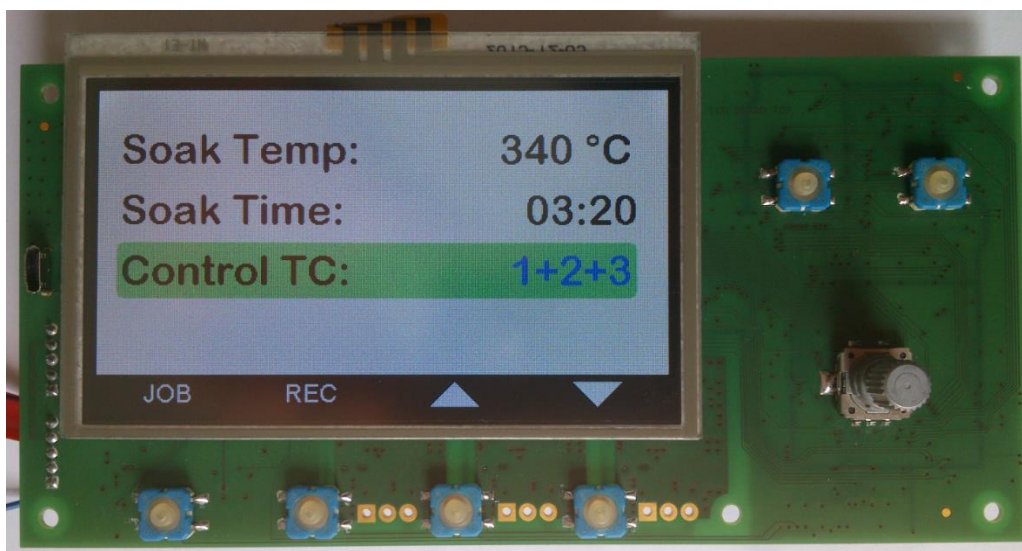
Obr. 29 znázorňuje obrazovku jedného z profilov ohrevu a jeho nastaviteľných parametrov vysvetlených na Obr. 30. Obrázky Obr. 31 a Obr. 32 sú praktickou ukážkou obrazoviek uvedených vyššie.



**Obr. 30** Nastaviteľné parametre ohrevu



**Obr. 31** Ukážka úvodnej obrazovky



**Obr. 32** Ukážka obrazovky s nastaviteľnými parametrami

# Záver

V rámci teoretickej časti tejto práce bola upriamená pozornosť predovšetkým na detailnú analýzu navrhovanej riadiacej jednotky indukčného ohrevu. Vychádzané bolo z blokovej schémy, ktorá nám uľahčila rozdeliť projekt do menších blokov. Takto rozdelený návrh bol následne podrobený analýze z hľadiska komponentov na trhu, kde okrem samotnej ceny bolo zohľadňované aj prispôsobenie k presnej špecifikácii dodanej spoločnosťou DAWELL, v spolupráci s ktorou vzniklo zadanie tejto práce.

Navrhnutý obvod je pripravený tak, aby bol schopný spracovávať analógové signály z troch identických termočlánkov. Tie sú následne zdigitalizované pomocou ADC prevodníkov (ADS1220) a prenesené do mikrokontroléra STM32F429 pomocou SPI zbernice. Na zobrazovanie aktuálnych hodnôt teploty spolu s požadovanými nastaveniami je použitý TFT display. Display slúži tiež aj ako grafické užívateľské rozhranie nahradzujúce tak štandardný 7 segmentový display bežne používaný pri týchto zariadeniach. Keďže navrhované zariadenie nájde využitie skôr v náročnejších podmienkach, veľa krát bude obsluhované s rukavicami, tak na ovládanie je miesto dotykového panelu pripravených 6 tlačidiel s enkodérom. Okrem samotného zobrazovania aktuálnych dát je možné ich aj ukladať na pamäťové médium. K uloženým dátam je potom možné sa kedykoľvek dostať pomocou pripraveného USB rozhrania. V prípade výpadku napájacieho napätia, kritické dáta a čas budú uložené do zálohovanej oblasti internej RAM pamäti.

K plnej funkčnosti navrhovaného zariadenia je treba ešte komunikovať cez zbernicu CAN s výkonovou časťou, o ktorej zhotovenie sa starala spoločnosť DAWELL. Nakoľko ladenie výkonovej časti bolo dokončené nie dlho pred odovzdaním diplomovej práce, spomínaná komunikácia nie je jej súčasťou.

# Zoznam obrázkov

Obr. 1 Bloková schéma riadiacej jednotky.....	8
Obr. 2 Porovnanie jadier Cortex M [1] .....	12
Obr. 3 ART akcelerátor [2] .....	15
Obr. 4 Bloková schéma LCD/TFT radiča [3] .....	16
Obr. 5 Principiálne zapojenie lineárneho regulátora [5] .....	17
Obr. 6 Elementárne zapojenie znižujúceho meniča [6] .....	18
Obr. 7 Princíp funkcie znižujúceho meniča [6] .....	18
Obr. 8 Modul WIFI SPWF01SA [7] .....	22
Obr. 9 Zapojenie SPI zbernice .....	23
Obr. 10 Protokol SPI [4] .....	24
Obr. 11 Zapojenie UART.....	24
Obr. 12 UART Protokol.....	24
Obr. 13 Zapojenie CAN zbernice [8] .....	25
Obr. 14 CAN Paket [8].....	25
Obr. 15 RGB rozhranie [9] .....	26
Obr. 16 Zapojenie USB zbernice [10].....	27
Obr. 17 USB paket [10].....	28
Obr. 18 Výmena dát na USB zbernici [10] .....	29
Obr. 19 Stavový automat úloh .....	31
Obr. 20 Ukážka okien [11] .....	33
Obr. 21 Vyhladzovací efekt [12] .....	34
Obr. 22 Prepojenie aplikácie s FAT systémom a pamäťami [13] .....	35
Obr. 23 Schéma zapojenia znižujúceho meniča .....	38
Obr. 24 Schéma zapojenia zvyšujúceho meniča .....	38
Obr. 25 Osadená doska plošného spoja (horná strana).....	40
Obr. 26 Osadená doska plošného spoja (spodná strana).....	40
Obr. 27 Rozdelenie úloh .....	41
Obr. 28 Predný panel prístroja s úvodnou obrazovkou .....	43
Obr. 29 Ukážka obrazovky s nastaviteľnými parametrami .....	43
Obr. 30 Nastaviteľné parametre ohrevu.....	44
Obr. 31 Ukážka úvodnej obrazovky.....	44
Obr. 32 Ukážka obrazovky s nastaviteľnými parametrami .....	44

# Zoznam tabuliek

Tab. 1 <i>Popis blokovej schémy</i> .....	8
Tab. 2 <i>Vybrané parametre mikrokontroléru</i> .....	14
Tab. 3 <i>Spotreba komponentov</i> .....	19
Tab. 4 <i>CAN paket</i> .....	25
Tab. 5 <i>Funkcie potrebné pre FAT systém</i> .....	35

# Zoznam použitých skratiek

MCU	Mikrokontrolér
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
ADC	Analógovo-digitálny prevodník
LCD	Liquid Crystal Display
TFT	Thin Film Transistor
USB	Universal Serial Bus
USB OTG	USB On The Go
CAN	Controller Area Network
RAM	Random Access Memory
SRAM	Static RAM
SDRAM	Synchronous Dynamic RAM
PC	Personal Computer
MMU	Memory Management Unit
DSP	Digital Signal processing
FPU	Floating Point Unit
FPGA	Field Programmable Gate Array
RISC	Reduced Instruction Set Computer
BMP	Bit Map
GIF	Graphics Interchange Format
FAT	File Allocation Table
RTOS	Real Time Operation System
LED	Light Emitting Diode
DPS	Doska plošných spojov



# Zoznam požitých zdrojov

- [1] Cortex M. *Arm* [online]. 2014 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/>
- [2] Ingenious architectural features allow ST to extract maximum performance from new microcontroller family based on ARM Cortex-M4. *Eda360insider* [online]. 2011 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <https://eda360insider.wordpress.com/2011/09/22/ingenious-architectural-features-allow-st-micro-to-extract-maximum-performance-from-new-microcontroller-family-based-on-arm-cortex-m4-cost-less-than-6-bucks-in-1000s/>
- [3] *Reference manual RM0090: STM32F429/439* [online]. 2015 [cit. 2015-12-09].
- [4] Interfacing with the Real World Using The SPI Bus. *Dynamicpatterns* [online]. 2011 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://csl.dynamicpatterns.com/2011/08/02/the-netduino-part-ii-interfacing-with-the-real-world-using-the-spi-bus/>
- [5] LDO regulator. *Circuitstoday* [online]. 2014 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/ldo-regulator>
- [6] Buck converter. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2013 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Buck\\_converter](https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter)
- [7] Datasheet SPWF01SC. *St* [online]. 2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00102124.pdf>
- [8] CAN bus. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012, 5.12.2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/CAN\\_bus](https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus)
- [9] Interfaceing Graphical Displays. *Cdn.energymicro* [online]. 26.3.2011 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: [http://cdn.energymicro.com/dl/an/pdf/an0047\\_efm32\\_graphical\\_display.pdf](http://cdn.energymicro.com/dl/an/pdf/an0047_efm32_graphical_display.pdf)
- [10] ST MICROELECTRONICS. *Developing USB applications using the STM32 ARM Cortex-M3 microcontroller* [online]. 2011 [cit. 2015-12-10].
- [11] *EmWin* [online]. Longon: Segger, 2009 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.segger.com/emwin.html>
- [12] *Antialiasing* [online]. Berlin: Snowbound Software, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.snowbound.com/resources/techtips/manipulate/using-aliasinganti-aliasing-tool-enhance-display-your-images>
- [13] *FAT system* [online]. Unknown: elm-chan, 2013 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html)
- [14] YIU, Yoseph. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. Third Edition. London: Newnes, 2013. ISBN 978-0124080829

[15] LINDEN, Peter. *Expert C Programming: Deep C Secrets*. Second Edition. Manchester: Prentice Hall, 2013. ISBN 978-0131774292.

[16] BURKHARD, Mann. *C pro mikrokontroléry*. Praha: Ben, 2003. ISBN 80-7300-077-6.

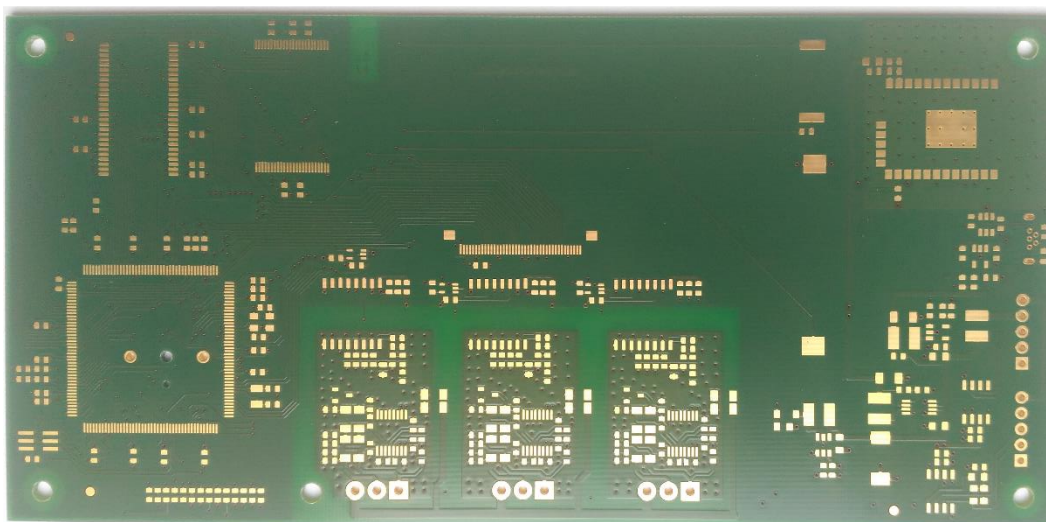
# Prílohy

## Príloha 1

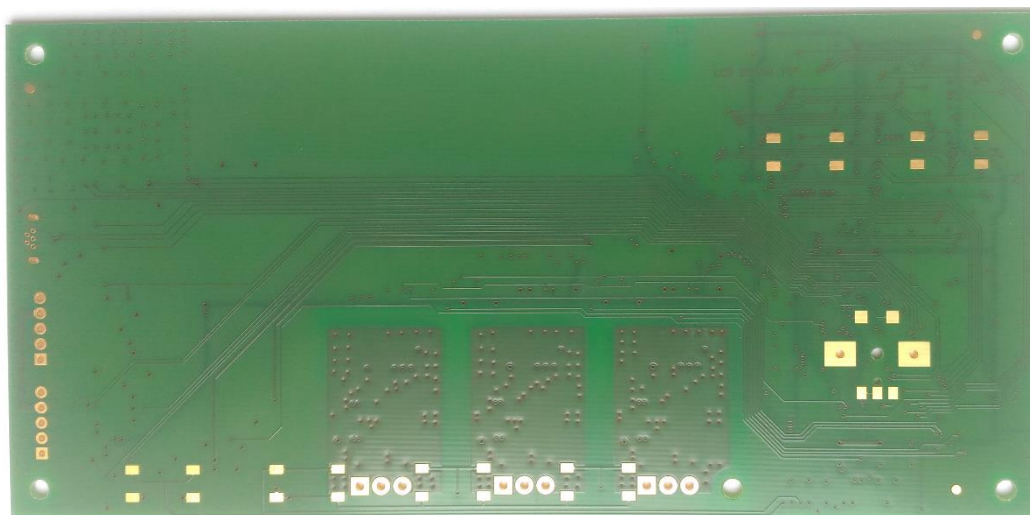
Schéma zapojenia je vo fáze utajenia.

## Príloha 2

Neosadená doska plošných spojov.



*Horná strana*



*Dolná strana*

**Príloha 3**

Výrobné dáta dosiek plošných spojov sú vo fáze utajenia.

**Príloha 4**

Manuál obsluhy prístroja je súčasťou obsahu CD.

**Príloha 5**

Zdrojový kód je vo fáze utajenia.